

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO PEREIRA DE LUCENA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO
PARABÓLICO PARA BAIXAS E MÉDIAS TEMPERATURAS**

Campina Grande–PB

Agosto/ 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO
PARABÓLICO PARA BAIXAS E MÉDIAS TEMPERATURAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, da Universidade
Federal de Campina Grande, em
exigência à obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Análise e Projeto
de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Campina Grande–PB
Agosto/ 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586d Silva, Leonardo Pereira de Lucena.
Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas / Leonardo Pereira de Lucena Silva. – Campina Grande-PB, 2015.
249 f. il., color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
"Orientação: Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior".
Referências.

1. Energia Solar. 2. Coletor Solar. 3. Coletor Parabólico. 4. Aquecimento Solar. 5. Aquecimento de Fluidos I. Amorim Júnior, Wanderley Ferreira de. II. Título.

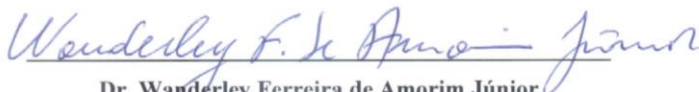
CDU 621.472(043)

DESENVOLVIMENTO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO PARA BAIXAS E MÉDIAS TEMPERATURAS

Leonardo Pereira de Lucena Silva

Dissertação aprovada em 31 de Agosto de 2015, pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:

Banca Examinadora:



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. José Nilton Silva

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai José Pereira da Silva que mesmo com sua paciência curta para me ensinar é a quem eu devo o meu gosto pelas ciências exatas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu pai Jose Pereira da Silva e a minha mãe Francisca Inácio de Lucena Silva por todo o apoio e incentivos que me deram durante toda a minha caminhada.

Agradeço a minha irmã Christianne Pereira de Lucena Silva e meu irmão Lucas Pereira de Lucena Silva que são pessoas que estiveram comigo durante toda a minha caminhada.

Aos amigos David Vinicius Lira Campos, Rodrigo Ferreira de Sousa e Francisco Fernando Roberto Pereira por estarem presente no decorrer da minha caminhada.

Agradeço ao professor Wanderley Ferreira de Amorim Junior por ter me dado a oportunidade de realizar esse trabalho, pelos seus diversos conselhos, conversas inspiradoras.

Agradeço ao Sebastião Araújo Coutinho, diretor da Suna Engenharia pela oportunidade de realizar esse trabalho junto a empresa e por toda a ajuda que me foi prestada durante o período de realização desse trabalho.

Agradeço aos colegas da Suna Engenharia Glauber Arruda, Aislan Queiroz, Hamilton Quirino, Ezequiel Honorato, Luciano Leite, Arthur Araújo e Orlando Tomaz e Edjan Tamaz pela a ajuda e aprendizados que adquiri no decorrer do desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos professores da banca, Antônio Gilson Barbosa de Lima e José Nilton Silva pelas sugestões que muito vieram a contribuir com esse trabalho.

A minha namorada Adriana Barbosa da Costa pelo incentivo dado durante a realização desse trabalho e pela compreensão nos momentos que tive que estar ausente para a realização do mesmo.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

RESUMO

Em face da atual crise energética, pela qual o Brasil vem passando, torna-se proeminente a inserção de novas fontes de energia a matriz energética nacional. Devido a sua localização e condições climáticas o nordeste brasileiro possui uma vocação para utilização de energia solar, principalmente para aplicações térmicas. Contudo os meios atualmente disponíveis são importados e a maioria deles apresentam temperaturas de trabalho inferiores a 50°C. O presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico 100% nacional e que possa atingir temperaturas da ordem de 90°C. Foi utilizada uma metodologia de projeto que consistiu no estudo de diversos coletores solares a fim de propor um coletor solar cilíndrico parabólico inteiramente nacional. Foi desenvolvido uma sistema de rastreamento solar, bem como uma instrumentação que permite avaliar o desempenho térmico do equipamento. Para avaliação de desempenho, o equipamento, foi realizado um teste de campo, bem como a simulação numérica do coletor. O teste de campo foi realizado no período de 09:30:00 a 12:30:00 onde foram monitoradas a temperatura em diversos pontos do coletor. A simulação numérica consistiu na solução das principais equações fenomenológicas envolvidas no processo de aquecimento solar, a partir de características do coletor e dados de radiação aquisitivos no momento dos testes. Como principais resultados obteve-se a eficiência global do coletor de 27,7%, bem como uma boa concordância com entre a curva experimental e a obtida pelo software.

ABSTRACT

Given the current energy crisis, in which Brazil has been going through, it becomes prominent inserting new energy sources to the national energy matrix. Due to its location and climate conditions, northeastern Brazil has a vocation for use of solar energy, especially for thermal applications. However currently available equipment to harness this energy, are imported and most of them have working temperatures below 50 ° C. This work aims the development of a cylindrical parabolic solar collector 100% national and that can reach temperatures of 100°C. The design methodology consisted in the study of several solar collectors in order to propose an entirely national Parabolic Trough. A solar tracking system has been developed, as well as an instrumentation one, which allows the assessment of the thermal performance of the equipment. For performance evaluation, the equipment went through a field test and numerical simulation of the collector was performed. The field test was carried out from 9h30am to 12:30am, where temperature in various points of the collector were monitored. The numerical simulation was based in the solution of the main phenomenological equations involved in a solar heating process, from collector features and radiation data during the tests. The main results obtained was the global efficiency of 27,7% as well as a good agreement between the experimental curve and the one obtained by the software.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
	1.1 Objetivos	27
	1.1.1 Objetivo Geral	27
	1.1.2 Específicos	27
	CAPÍTULO 2	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
	2.1 História da Energia Solar	28
	2.2 O Sol	33
	2.2.1. Energia Solar	36
	2.3 Aproveitamento da Energia Solar	41
	2.3.2 Coletores Térmicos	43
	2.4 Escolha do Coletor a ser utilizado	54
	2.5 Projeto do Coletor Solar de Calha Parabólica	56
	2.5.1 Superfície Refletora	56
	2.5.2 Tubo absorvedor	66
	2.5.3 Sistema de rastreamento solar	72
	2.5.4 Estrutura do coletor	75
	CAPITULO 3	77
3	METODOLOGIA	77
	3.1 Metodologia de projeto para o desenvolvimento do coletor solar cilíndrico parabólico	77
	3.2 Metodologia para o teste de campo do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico	79
	3.2.1 Detalhamento dos sensores	82
	3.3 Metodologia de simulação computacional do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico.	83
	CAPÍTULO 4	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86

4.1 Projeto informacional de um coletor solar cilíndrico parabólico	86
4.1.1 - Projeto, Construção e Levantamento de Desempenho de um Concentrador Solar Cilindro Parabólico com Mecanismo Automático de Rastreamento Solar	86
4.1.2 - Análise Experimental de um Sistema Solar com Concentrador Cilindro Parabólico	91
4.1.3 - Análise do rendimento térmico do aquecedor solar parabólico cilíndrico	101
4.1.4 - Projeto e construção de um aquecedor solar concentrador	105
4.1.5 - Projeto e construção de um concentrador solar	111
4.1.6 - Projeto e construção de um aquecedor solar com concentrador	119
4.1.7 - Projeto, fabricação e testes experimentais de um coletor solar cilindro parabólico com sistema de rastreamento automático	125
4.1.8 - Projeto e Fabricação de um Coletor Solar Cilindro Parabólico para Fins Educacionais	133
4.1.9 - Parabolic Trough Collector	138
4.1.10 - Solar Energy Converter	143
4.1.11 - Solar Collector System	145
4.1.12 - Solar Reflection Apparatus	149
4.1.13 - Levantamento dos Requisitos	153
4.2 Projeto Conceitual de um coletor solar cilíndrico parabólico	154
4.2.1 Superfície refletora	155
4.2.2 Tubo absorvedor	159
4.2.3 Sistema De Rastreamento Solar	170
4.2.4 Estrutura	178
4.3 Projeto Preliminar do coletor solar cilíndrico parabólico	182
4.3.1 Superfície refletora	183
4.3.2 Tubo absorvedor	187
4.3.3 Sistema de rastreamento Solar	190

4.3.4 Estrutura.....	194
4.4 Projeto detalhado.....	204
4.5 Fabricação	204
4.5.1 Fabricação mecânica.....	204
4.5.2 Fabricação da instrumentação desenvolvida	210
4.6 Testes.....	214
4.6.1 1º TESTE – Motor de Portão.....	215
4.5.2 2º TESTE – Utilização de um motor de para-brisa	217
4.5.3 3º TESTE – Motoredutor.....	218
4.5.4 Re-projeto do tubo absorvedor	223
4.5.5 Testes de campo do coletor solar cilíndrico parabólico.....	225
CAPÍTULO 5	241
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	241
5.1 Conclusões.....	241
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	243
CAPÍTULO 6	244
6 REFERÊNCIAS	244

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Sistema integrado de geração de renda.....	24
Figura 1.2- Sistema de Dessalinização por Umidificação e Desumidificação.	26
Figura 2.1 - Estatua do Deus Sol (Apolo).	28
Figura 2.2 - Espelho de Arquimedes.	29
Figura 2.3 - Forno Solar de Lavoisier.....	30
Figura 2.4 - Primeiro coletor solar em larga escala, exibido por August Mouchot em 1878...30	
Figura 2.5 - Coletor Solar Parabólico de John Ericsson.....	32
Figura 2.6 - Planta de irrigação – Egito.....	32
Figura 2.7 - Estrutura do Sol	34
Figura 2.8 - Quantidade de radiação que incide sobre a atmosfera terrestre (Constante Solar)	35
Figura 2.9 - Processos de atenuação da radiação solar na atmosfera terrestre.	36
Figura 2.10 - Processos de atenuação da radiação solar ao passar através da atmosfera.	37
Figura 2.11 – Atenuação da potência térmica devido a fatores atmosféricos dentro do espectro da radiação solar	38
Figura 2.12 - Massa de ar relativa.	39
Figura 2.13 - Componentes da radiação solar incidentes sobre uma superfície.....	40
Figura 2.14 - Angulo de inclinação dos raios solares.....	41
Figura 2.15 - Fluxograma das Aplicações da Energia Solar.	42
Figura 2.16 –Diversas formas de aproveitamento da energia.	43
Figura 2.17 - Comparativo entre diversas tecnologias de coletores solares.....	44
Figura 2.18 – Coletor solar plano.....	45
Figura 2.19 - Desenho esquemático de um sistema de aquecimento solar.....	47
Figura 2.20 - Diagrama esquemático dos fluxos de energia no coletor solar.....	48
Figura 2.21 - Eficiência do coletor solar a diferentes irradiações e temperaturas.....	49
Figura 2.22 - Participação do total da geração elétrica por tecnologia de coleta solar.	51
Figura 2.23 - Representação de coletor cilíndrico parabólico.	51
Figura 2.24 - Mecanismo de Rastreamento Solar - Leste/Oeste.	53
Figura 2.25 - Comparação entre as duas principais aplicações dos coletores cilíndricos parabólicos. (a) Aquecimento industrial e predial (b) Geração de energia elétrica.	54
Figura 2.26 - Comparação entre Coletores Solares.	55

Figura 2.27- Relação entre o Fator de Concentração e a temperatura atingida na saída do coletor.	57
Figura 2.28 - (a) Representação da reflexão em uma parábola, (b) Teste realizado na superfície refletora de um coletor cilíndrico parabólico.	58
Figura 2.29 - Parâmetros geométricos do coletor cilíndrico parabólico.....	58
Figura 2.30 - Relação entre o ângulo de borda e a relação (a/f).....	60
Figura 2.31 - Relação entre a distância focal e o ângulo de borda para um mesma abertura...	61
Figura 2.32 - Representação da área de abertura do coletor.....	62
Figura 2.33 - Montagem de um coletor cilíndrico parabólico.	63
Figura 2.34 - Refletividade da camada de Prata (Ag).	64
Figura 2.35 - Película refletiva ReflecTech.	65
Figura 2.36 - Comparação da refletividade do alumínio com o da prata para o comprimento de onda da radiação solar.	66
Figura 2.37 - Principais partes de um tubo absorvedor.	67
Figura 2.38 - Superfície absorvedora formada por multicamadas.....	68
Figura 2.39- Representação da radiação solar quando refletida pelo coletor cilíndrico parabólico.	69
Figura 2.40 -Determinação do diâmetro externo do tubo metálico.....	70
Figura 2.41 - Transmissividade espectral de diversos materiais com relativamente ao espectro solar.	71
Figura 2.42 - Perdas térmicas pela diferença de temperatura entre tubo metálico e ambiente	72
Figura 2.43 - Rastreamento solar com 1 grau de liberdade.	73
Figura 2.44 - Rastreamento solar em 1 (a) e 2 (b) graus de liberdade.....	73
Figura 2.45 - Direções mais usuais para o posicionamento do coletor cilíndrico parabólico. .	74
Figura 2.46 - Irradiação por área durante as horas do dia em diferentes estações e posicionamentos.	75
Figura 2.47- Carregamentos simulados através do Método de Elementos Finitos (FEA).	76
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de projeto utilizado nesse trabalho.....	78
Figura 3.2 - Aparato para teste do coletor solar cilíndrico parabólico.	79
Figura 3.3 - Instrumentação do coletor solar cilíndrico parabólico.....	80
Figura 3.4 - Processo de aquecimento simulado.	83
Figura 3.5 - Detalhes do coletor solar cilíndrico parabólico simulado.....	84
Figura 4.1 - Desenho do Molde do concentrador Cilindro-Parabólico.	87
Figura 4.2 - Análise do direcionamento dos raios solares.	87

Figura 4.3 - Desenho da modificação do perfil.	88
Figura 4.4 - Nova análise direcional dos raios solares	88
Figura 4.5 - Desenho da estrutura do coletor.....	89
Figura 4.6 - Tubo absorvedor do concentrador proposto.	89
Figura 4.7- Diagrama elétrico do controlador.	90
Figura 4.8 - Sistema de automatização do concentrador solar.	90
Figura 4.9 - Esquema de Termoconversão de energia solar.....	91
Figura 4.10- Ilustração do aparato experimental utilizado	92
Figura 4.11 – Costela do coletor parabólico.....	93
Figura 4.12 Estrutura do coletor cilindro parabólico.	94
Figura 4.13 - Estrutura de suporte.	94
Figura 4.14 - Rolo da película refletiva.....	95
Figura 4.15 - Partes do tubo absorvedor.....	96
Figura 4.16 - Esquema de montagens dos tubos.	97
Figura 4.17 - Tubo de vidro para visualização do escoamento.	97
Figura 4.18 - Atuador linear da Fusionseeker acoplado a suporte.	98
Figura 4.19 - Controle de posicionamento solar Fusionseeker DS-50S5.....	99
Figura 4.20 - Montagem do coletor cilindro parabólico.....	99
Figura 4.21 - Representação de perdas de final de linha num Coletor Solar Cilindro Parabólico	100
Figura 4.22 - Vistas do coletor cilíndrico parabólico.	101
Figura 4.23 - Partes do coletor cilindro parabólico.	103
Figura 4.24 - Elemento absorvedor montado na coletor.	104
Figura 4.25 - Representação 3D do coletor solar.	105
Figura 4.26 - Posicionamento da bomba no interior do reservatório.	107
Figura 4.27 - Timer analógico.	107
Figura 4.28 - Modelo para corte da parábola.....	108
Figura 4.29 - Corte dos contornos da parábola.....	109
Figura 4.30 - Fixação da superfície refletiva.	109
Figura 4.31 - Conexão do tubo absorvedor na estrutura do coletor.	110
Figura 4.32 - Coletor cilindro parabólico montado.	110
Figura 4.33 - Perfis parabólicos do coletor.....	113
Figura 4.34 - Projeto Conceitual do tubo absorvedor.....	114
Figura 4.35 - Tubos absorvedores utilizados no coletor.....	116

Figura 4.36- Dependência espectral das transmitâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados.	116
Figura 4.37 - Conexões de PTFE.....	117
Figura 4.38 - Tubos absorvedores utilizadas.	117
Figura 4.39 - Estrutura do coletor.....	118
Figura 4.40 - Montagem do coletor.	119
Figura 4.41 - Sistema de rastreamento adotado.....	120
Figura 4.42 - Gráfico para a determinação do ângulo de borda.	121
Figura 4.43 - Procedimento adotado para a construção da curva parabólica.	122
Figura 4.44 - Estrutura da calha parabólica.	122
Figura 4.45 - Tubo absorvedor utilizado.	123
Figura 4.46 - Sistema de movimentação do coletor.	124
Figura 4.47 - Testes de aplicação do papel alumínio.	124
Figura 4.48 - Protótipo do coletor.	125
Figura 4.49 - Representação esquemática do perfil parabólico.....	127
Figura 4.50 - Suporte do coletor solar.	127
Figura 4.51 - Suporte para a superfície refletora.	127
Figura 4.52 - Suporte do tubo absorvedor.	128
Figura 4.53 - Tubo absorvedor utilizado no coletor.	128
Figura 4.54 - Seção transversal do tubo absorvedor.....	129
Figura 4.55 - Superfície refletora feita a partir de alumínio polido.....	129
Figura 4.56 - Superfície refletora feita a partir de finas lâminas de vidro.....	130
Figura 4.57 - Sistema de controle do rastreador solar.	131
Figura 4.58 - Montagem do coletor com a superfície de refletora (A) Alumínio Polido e (B) lâminas de vidro.....	132
Figura 4.59 - Temperatura do fluido na saída do coletor por horário do dia.....	132
Figura 4.60 - Estrutura da superfície refletora utilizada no Coletor Solar de Calha Parabólica.	134
Figura 4.61 - Tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	135
Figura 4.62 - Tanque de inércia térmica utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.....	135
Figura 4.63 - Sistema de fornecimento de energia elétrica para o subsistema de controle do coletor solar cilíndrico parabólico.	136
Figura 4.64 - Sistema de correção no posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.	137

Figura 4.65 - Bancada de aquecimento solar.....	138
Figura 4.66 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico que compõe o inventor.	139
Figura 4.67 - Carregamentos estáticos atuando na estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.	140
Figura 4.68 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico destacando a haste de sustentação do tubo absorvedor.	141
Figura 4.69 - Perspectiva do sistema de alinhamento horizontal do coletor solar cilíndrico parabólico	142
Figura 4.70 - Elemento de alta rigidez adicionado a estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico	142
Figura 4.71 - Perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico.	143
Figura 4.72 - Sistema de acionamento simultâneo do coletor solar cilíndrico parabólico.	143
Figura 4.73 - Acoplamento em série de coletor solar cilíndrico parabólico.....	145
Figura 4.74 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico acionado por pistões hidráulicos.	146
Figura 4.75 - Estrutura de sustentação do coletor solar cilíndrico parabólico.	147
Figura 4.76 - Atuadores do sistema de rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico.	148
Figura 4.77 - Pontos extremos de posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.....	148
Figura 4.78 - Desbalanceamento na distribuição de massa com relação ao eixo de rotação de um coletor solar cilíndrico parabólico.	149
Figura 4.79 - coletor solar cilíndrico parabólico com o centro massa coincidente com o centro de rotação.....	150
Figura 4.80 - Perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico balanceado pela utilização de um contrapeso.....	151
Figura 4.81 - Sistema de acionamento do tipo coroa e sem-fim para o rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico.	152
Figura 4.82 - Célula do sistema de aquecimento utilizando o coletor solar cilíndrico parabólico.	153
Figura 4.83- Concepção do perfil utilizado na superfície refletora do coletor solar cilíndrico parabólico	156
Figura 4.84 - Concepção do tubo interno do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	162

Figura 4.85 - Comparação das perdas térmicas com e sem tubo transparente	165
Figura 4.86 - Conceito do tubo transparente do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	166
Figura 4.87 - Conexões do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico. (a) Conexão fêmea e (b) Conexão macho	169
Figura 4.88 - Conceito do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico .	169
Figura 4.89 - Diagramas de controle do Sistema de Rastreamento Solar a ser utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico. (a) Controle em Malha Aberta e (b) Controle em Malha Fechada.	170
Figura 4.90 - Conceito do atuador utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	177
.....	177
Figura 4.91 - Conceito da Estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico	181
.....	181
Figura 4.92 - Projeto Conceitual do coletor solar cilíndrico parabólico	182
Figura 4.93 - Refletividade do aço inox 304 com o comprimento de onda	186
Figura 4.94 - Catálogo de chapas de aço inox refletivo.	187
Figura 4.95 - Determinação do diâmetro interno do tubo transparente a partir do diâmetro externo do tubo interno.....	189
Figura 4.96 - Diâmetros comerciais para o tubo interno	189
Figura 4.97 - 1ª opção para atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	191
Figura 4.98 - Seleção do atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	192
Figura 4.99 - Sistema de controle de inclinação a partir de dois fotosensores.....	193
Figura 4.100 - Simulação de flexão na estrutura da superfície refletora utilizada no coletor solar cilíndrico parabólico – (a) análise de tensão e (b) análise de deformação.	196
Figura 4.101 - Condição imaginada para as análises de torção na estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.	197
Figura 4.102 - Simulação de torção na estrutura da superfície refletora utilizada no coletor solar cilíndrico parabólico – (a) análise de tensão e (b) análise de deformação	198
Figura 4.103 - Modelo proposto para a simulação da folha de aço inox utilizada como Superfície Refletora	199
Figura 4.104 - Resultado das simulações (a) Tensão de Von Mises pela velocidade de vento (b) Deslocamento pela velocidade do vento	200

Figura 4.105 – Deformação pela velocidade de vento na folha metálica utilizada como Superfície de Reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico. (a) 6 m/s, (b) 8 m/s, (c) 10 m/s e (d) 12 m/s.....	201
Figura 4.106 - Tensão pela velocidade de vento na folha metálica utilizada como Superfície de Reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico. (a) 6 m/s, (b) 8 m/s, (c) 10 m/s e (d) 12 m/s.	202
Figura 4.107 - Sistema de movimentação utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico ...	203
Figura 4.108 - Catalogo utilizado para a seleção do rodízio	203
Figura 4.109 - Máquina de corte a plasma semelhante a utilizada no corte dos perfis parabólicos.	205
Figura 4.110 - Perfis obtidos no corte a laser.	206
Figura 4.111 - Fabricação do suporte lateral do coletor solar cilíndrico parabólico.	206
Figura 4.112 - Extremidade do tubo absorvedor acoplado a um tubo para conexão a tubulação do sistema de aquecimento.	207
Figura 4.113 - Montagem do tubo absorvedor	208
Figura 4.114 - Montagem da estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.	209
Figura 4.115 - 1º Protótipo do coletor solar cilíndrico parabólico	210
Figura 4.116 - Teste do circuito de aquisição de temperatura na Protoboard.	211
Figura 4.117 - Desenvolvimento de aquisição de dados do coletor solar cilíndrico parabólico.	211
Figura 4.118 - Sistema de comutação de giro.	212
Figura 4.119 -Sensor para controle de posição do coletor solar cilíndrico parabólico	212
Figura 4.120 - Placa de aquisição de temperaturas e vazão utilizada nos testes de campo do coletor solar cilíndrico parabólico	213
Figura 4.121 - Sistema de aquisição e armazenamento dos dados de temperaturas e vazão .	214
Figura 4.122 - Teste de estresse realizado no motor de portão	216
Figura 4.123 - Motor de para-brisa utilizado testado como possível atuador do sistema de controle	217
Figura 4.124 - Motoredutor utilizado no sistema de controle do coletor solar cilíndrico parabólico	218
Figura 4.125 - Redutor de velocidade utilizado no sistema de atuação do coletor solar cilíndrico parabólico	219
Figura 4.126 - Montagem do motorreductor acoplado a redutor externo	219

Figura 4.127 - Teste para a estimativa do torque necessário para a movimentação do coletor solar cilíndrico parabólico	220
Figura 4.128 - Sequência utilizada para a mudança do centro de giro do coletor solar cilíndrico parabólico	221
Figura 4.129 - Atuador utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	222
Figura 4.130 – Seleção do atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico	223
Figura 4.131 - Conceito do novo tubo absorvedor do coletor solar cilíndrico parabólico	224
Figura 4.132 - Processo de fabricação do novo Tubo Absorvedor do coletor solar cilíndrico parabólico	225
Figura 4.133 - Sistema para teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico	226
Figura 4.134 - Sensores utilizados no teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico	226
Figura 4.135 - Sensores utilizados no teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico	227
Figura 4.136 - Inclinação do muro da Suna Engenharia com relação a direção Norte-Sul....	228
Figura 4.137 - Temperatura X Horário para o tanque de inércia térmica (STF8) e a superfície do tubo absorvedor (STS4).....	229
Figura 4.138 - Temperatura do fluido X Horário nas extremidades do tubo absorvedor.....	230
Figura 4.139 - Temperatura X Horário para as extremidades do tubo absorvedor	231
Figura 4.140 - Perdas de final de linha apresentadas pelo coletor solar cilíndrico parabólico	232
Figura 4.141 – Sombreamento da superfície refletiva devido as extremidades do coletor solar cilíndrico parabólico	232
Figura 4.142 - Acurácia do sistema de rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico	233
Figura 4.143 - Acurácia da superfície refletiva do coletor solar cilíndrico parabólico	234
Figura 4.144 - Pontos de dispersão de radiação da superfície refletora do coletor solar cilíndrico parabólico	234
Figura 4.145 - Irradiação Solar Direta no dia 27/08/2015.....	235
Figura 4.146 - Irradiação Solar no dia 27/08/2015.....	236
Figura 4.147 - Simulação Numérica de aquecimento para o coletor solar cilíndrico parabólico	238
Figura 4.148 - Comparação entre os dados experimentais e simulação numérica do coletor solar cilíndrico parabólico	239

Figura 4.149 - Sobreposição entre os dados simulados e experimentais do coletor solar cilíndrico parabólico com a radiação solar direta no dia do experimento	240
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Sensores utilizados no coletor solar cilíndrico parabólico.	81
Tabela 3.2 - Principais dados para a simulação computacional.	85
Tabela 4.1- Dados básicos do aquecedor.....	102
Tabela 4.2 - Estabelecimento de necessidades.	111
Tabela 4. 3 - Propriedades Radioativas Solares para materiais Seleccionados ($T=300\text{ K}$).....	114
Tabela 4.4 - Propriedades radioativas solares para materiais seleccionados ($T = 300\text{ K}$).	115
Tabela 4.5 - Princípios de solução estudados para a superfície de reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico.	157
Tabela 4.6 - Princípios de solução para a superfície do tubo interno do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	160
Tabela 4.7 - Princípios de solução do tubo transparente do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	163
Tabela 4.8 - Princípios de solução das conexões do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	167
Tabela 4.9 - Principais soluções para controle do posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.	172
Tabela 4.10 - Principais soluções para o atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.	175
Tabela 4.11 - Princípios de soluções para a estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.	178
Tabela 4.12 - Comparação entre materiais da superfície refletiva.	185

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas

α	Absortividade
ψ	Ângulo de borda
θ	Ângulo de incidência da radiação solar
φ	Ângulo Zenital
σ	Constante de Stefan-Boltzmann;
ΔT	Diferença de temperatura entre o tubo metálico e o ambiente
η	Eficiência do coletor
η_u	Eficiência global do coletor
η_o	Eficiência ótica
η_t	Eficiência térmica
ε_λ	Emissividade
$\Gamma(\theta)$	Fator de perdas de final de linha
τ	Transmissividade
ρ	Volume específico do ar

Letras Latinas

w	Abertura do coletor
a	Comprimento de abertura
A_a	Área de abertura do coletor
A_{ext}	Área externa do coletor.
A_r	Área projetada do receptor
A_{ap}	Área projetada do coletor
A	Área superficial do coletor
c	Calor específica da água
C_d	Coeficiente de Arrasto para uma calha cilíndrica
h_{conv}	Coeficiente de transferência de calor por convecção
l	Comprimento do coletor
K	Condutividade térmica

G_{SC}	Constante solar
r_{SE}	Distância entre o Sol e a Terra
f	Distância focal
$Q_{\text{útil}}$	Energia absorvida pelo líquido
$\dot{Q}_{\text{útil}}$	Energia demandada do coletor
\dot{Q}_{disp}	Energia térmica solar desnível
m	Fluxo de massa de água
G	Irradiação solar instantânea incidente sobre o coletor
P_S	Potência radiante do Sol
r_s	Raio do Sol
C	Taxa de Concentração por área
T_{∞}	Temperatura do ambiente.
T_{SC}	Temperatura da superfície do coletor
T_s	Temperatura da superfície do Sol
q_{conv}	Transferência de calor do Coletor Solar para o meio;
v_{∞}	Velocidade do ar

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

CNC	Comando Numérico Computacional
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CSP	Concentrated Solar Power
FAPESQ	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
UNICEF	Fundo das Nações Unidas para a Infância
LPI	Laboratório de Projeto e Instrumentos
AM	Massa de ar relativo
NREL	National Renewable Energy Laboratory
ppm	Partes por milhão
SEGS	Solar Energy Generating Systems
STF	Sistema de medição de Temperatura do Fluido
STS	Sistema de medição de Temperatura Seca
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TDS	Total Dissolved Solids
3D	Três dimensões
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USA	United States America
USP	Universidade de São Paulo
WRC	World Radiation Center

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, uma das regiões mais afetadas pela falta d'água é o semiárido Nordeste. Essa região corresponde a 11% do território nacional, possui cerca de 12% de toda a população do país, distribuindo-se por todos os estados do Nordeste e parte do estado de Minas Gerais. Nessa região são comuns longas estiagens, em torno de 20 em cada 100 anos (MARENGO, 2006).

De maneira geral, o solo do semiárido é composto por rochas cristalinas com elevado teor de sais e baixas porosidade e permeabilidade, resultando em lençóis freáticos com elevada salinidade. A água salobra proveniente dos poços perfurados nesse tipo de formação, sem o devido tratamento é imprópria ao consumo, podendo inclusive causar diversas doenças.

Segundo documento oficial da UNICEF (2003), em 95% dos municípios que compõem o semiárido, a mortalidade infantil é superior à média nacional, sendo que 34% dos óbitos é de crianças com menos de 1 ano de idade. Esses óbitos ocorrem em consequência de afecções perinatais, infecções respiratórias e deficiências nutricionais, moléstias que poderiam ser amenizadas com o acesso a água de qualidade e a higiene adequada. Como resultado dessa pouca adequação do homem às condições do semiárido, vê-se um Índice de Desenvolvimento Humano baixo e a migração para os grandes centros urbanos.

As técnicas de dessalinização de águas surgiram como alternativa para solucionar o problema da escassez de água potável. Através destas é possível obter uma água, antes com elevada salinidade, que atenda aos padrões de potabilidade, que no Brasil, de acordo com a resolução 357/2005 do CONAMA, tem como limite aceitável de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) 500 ppm, ou ainda, 0,5 g/L.

A fim de melhorar a interação do homem com o ambiente do semiárido, o Programa Água Doce deu início à implementação, em comunidades carentes, de soluções que venham a contribuir para a disponibilidade de água de qualidade para o consumo humano. Contudo, a água produzida atualmente pelos sistemas de dessalinização, só é suficiente para o consumo humano e não é a água que fixa o homem na zona rural, mas sim uma maneira que lhe permita trabalhar e gerar renda como resultado do seu trabalho.

Um aspecto negativo da proposta do Programa Água Doce diz respeito à destinação do efluente gerado pela dessalinização, uma vez que utiliza a técnica da Osmose Reversa. Pode-se esperar que para cada litro de água pura produzida, será também produzido um litro de rejeito com elevado teor de sais, que não deve ser lançado diretamente na natureza e que apresenta um

permitissem esse sistema ser utilizado de maneira adequada pelo seu público alvo.

Características como:

- Sistema de pequeno porte;
- Fácil operação e manutenção;
- Baixa demanda de energia elétrica.

As características mencionadas acima, são condições proeminentes para um sistema adequado a uma pequena propriedade rural localizada no semiárido nordestino. Esses foram os requisitos básicos para o desenvolvimento da “Unidade de Purificação de Água”, mostrada na Figura 1.1

Ciente dos custos envolvidos nos processos que levam a inovação tecnológica, a Suna Engenharia resolveu procurar órgãos de fomento que aceitassem compartilhar os riscos envolvidos no desenvolvimento do dessalinizador. A partir dessa busca chegou-se até o EDITAL 004/2013 - FINEP/FAPESQ – Programa TECNOVA – PB, que atualmente está sendo desenvolvido pela Suna Engenharia.

Como uma das primeiras ações de projeto, devido à complexidade do produto que deseja desenvolver, a Suna Engenharia se apressou para estabelecer parcerias estratégicas que viabilizaria o desenvolvimento do produto dentro do prazo e especificações requeridos.

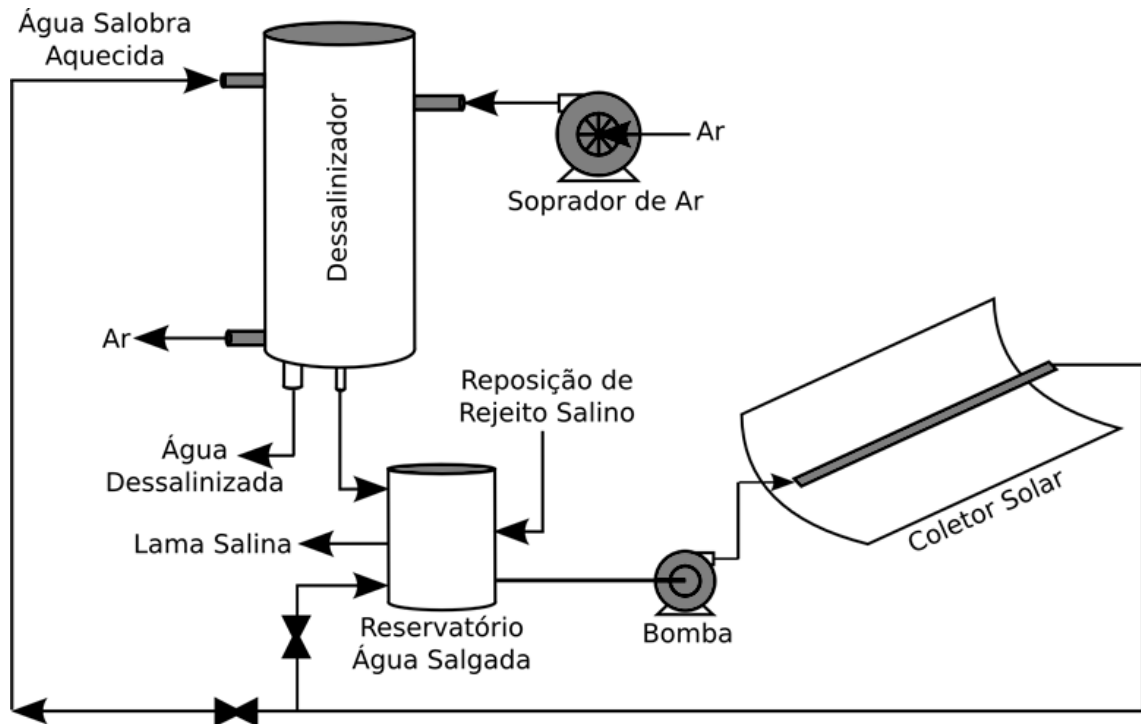
Devido a sua localização na cidade de Campina Grande e por acreditar que a parceria Universidade-Empresa é a maneira mais rápida de alavancar a inovação no Brasil, a Suna Engenharia estreitou as suas relações com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Após diversas conversas e reuniões, foi firmada a parceria com o Laboratório de Projeto e Instrumentos (LPI), coordenado pelo professor Wanderley Ferreira de Amorim Júnior da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica.

O primeiro conceito gerado para esse sistema de dessalinização, como mostra Coutinho (2013), é apresentado na Figura 1.2. A principal vantagem competitiva apresentada por esse sistema é a possibilidade do mesmo funcionar inteiramente a partir de energia solar. Energia solar térmica para aquecimento do fluido antes de sua entrada no dessalinizador e energia fotovoltaica para a movimentação do soprador de ar e bomba de circulação da água.

O modelo de dessalinizador proposto pela Suna Engenharia funciona de forma similar ao processo da chuva. Esse equipamento possui duas câmaras, onde em uma câmara ocorre a vaporização da água e na outra a condensação da água já isenta de sal. A água deve entrar no dessalinizador já aquecida ($\sim 90^{\circ}\text{C}$). Esse aquecimento deve ser realizado com o intuito de elevar a volatilidade da água na câmara de umidificação, bem como o de elevar a temperatura do ar,

aumentando assim a sua capacidade de carrear esse vapor, e melhorando a eficiência na produção de água dessalinizada.

Figura 1.2- Sistema de Dessalinização por Umidificação e Desumidificação.



Fonte: Coutinho, (2013)

Atualmente, um dos gargalos para viabilização dessa solução é o fato de que os aquecedores solares comercializados no Brasil apresentam baixa eficiência quando trabalham sob temperaturas ideais para esse processo. Essa baixa eficiência é decorrente do fato desses equipamentos de aquecimento terem sido dimensionados para trabalharem a temperaturas próximas a 60°C, assim quando há uma elevação dessa temperatura, há (também) um aumento das perdas térmicas, levando à um superdimensionamento do sistema de aquecimento.

Um outro problema dos coletores planos comercializados nos dias atuais, é o fato de eles terem sido projetados para baixas vazões (aquecimento de água de banho), assim quando implementados em sistemas que demandam altas vazões, é necessário grandes áreas de coleta sob pena de não atingir a diferença de temperatura desejada.

Os problemas abordados, levam à um aumento do custo de aquisição da solução de dessalinização, bem com uma maior demanda de área para que o mesmo seja instalado. Ambos, diminuem a competitividade desse produto.

Em decorrência do que foi abordado até o presente momento, bem como da necessidade de um sistema de dessalinização que funcione unicamente a partir da fonte solar, foi proposto o estudo para o desenvolvimento de um aquecedor solar com tecnologia inteiramente nacional, e que apresente uma eficiência adequada na temperatura de 90°C

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo geral o projeto, fabricação e teste de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas.

1.1.2 Específicos

- Levantamento do estado da arte dos sistemas de aquecimento solar;
- Fabricação do protótipo usando tecnologia local;
- Propor uma metodologia de análise visual do equipamento, como método indireto de avaliação do desempenho térmico.
- Simulação em ambiente FORTRAN do coletor solar cilíndrico parabólico.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 História da Energia Solar

Desde os primórdios da humanidade a luz provinda do Sol foi a forma mais apreciável de conseguir energia, seja ela para apenas preparar alimentos, acender uma fogueira, ou usar a luz solar em experiências. Visto que a energia do Sol, se comparado com as outras fontes é aceita como inesgotável, mais proveitoso seria se o homem a usasse com mais incentivos, no entanto com o decorrer da civilização, a humanidade conseguiu de outras fontes uma maior eficiência de energia, como por exemplo, a dos resíduos fósseis, a da água, do vento, dos animais, nuclear.

O sol, na antiguidade era tão precioso que os povos acreditavam que existia um Deus-Sol como mostra a (Figura 2.1), Apolo (Gregos) e outras culturas cultuavam seus respectivos deuses, Kukulcán (Maias), Quetzacoatl (Astecas), Rá (Egípcios), Invicto (Romanos). E com isso foi-se tornando a adoração do Sol em toda a história humana.

Figura 2.1 - Estatua do Deus Sol (Apolo).



Fonte: http://mv.vatican.va/3_EN/pages/x-Schede/MPCs/MPCs_Sala02_01.html, acesso em 10/03/2015.

Segundo Kalogirou (2009), o fato mais antigo do uso da energia solar é creditado a Arquimedes (282 a 212 a.C.), concentrando raios solares em um foco a ponto de aquecê-los (Figura 2.2). O aparelho usado por Arquimedes foi descrito como um vidro composto com 24 espelhos que convergiam para um único ponto focal, no entanto alguns historiadores acreditam que Arquimedes teria utilizado escudos de soldados em vez de espelhos em função da tecnologia de manufatura de vidros creditada àquela época.

Figura 2.2 - Espelho de Arquimedes.



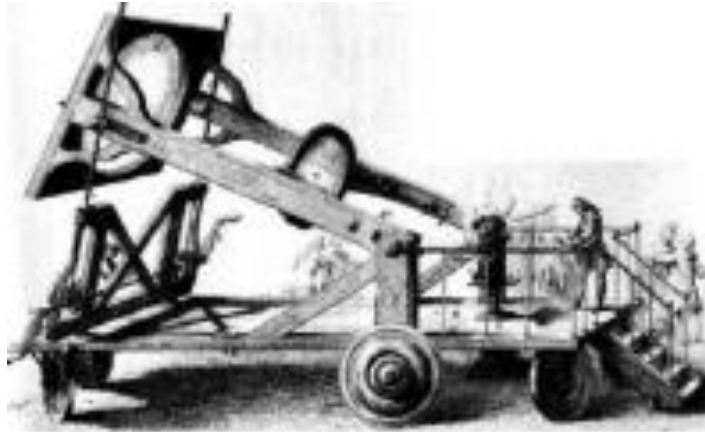
Fonte: <http://inconsciente coletivo.net/cientistas-estudam-lenda-de-espelho-grego-que-queimava-navios/#>, acesso em 10/03/2015.

Depois de Arquimedes, muitos outros inventores cientistas usaram a grande potência energética do Sol e apenas no século XVIII, Antoine Laurent Lavoisier construiu um Forno Solar (Figura 2.3) que consistia de duas lentes para a concentração dos raios solares atingindo cerca de 1750°C (Kalogirou, 2009).

No século XIX, a primeira experiência na qual a Energia Solar foi utilizada, é dirigida a Stock e Heynemann, na Alemanha. Os cientistas construíram um forno solar, com base nos princípios de Lavoisier (Figura 2.3) para fundir alguns materiais metálicos (Meinel, 1979).

No ano de 1870, surgiram os primeiros protótipos dos Coletores Solares Parabólicos, (CSP) criação concretizada pelo Engenheiro Americano John Ericsson que projetou e construiu um coletor de 3,25 m² de abertura utilizado para mover um pequeno motor de 373W. Em sua aplicação, o vapor era gerado internamente ao tubo coletor (atualmente chamada *Direct steam generation*). Entre os anos de 1872 a 1875, Ericsson construiu sete sistemas similares aos mencionados anteriormente, diferindo apenas no tocante ao fluido de trabalho (Pytlinski, 1978).

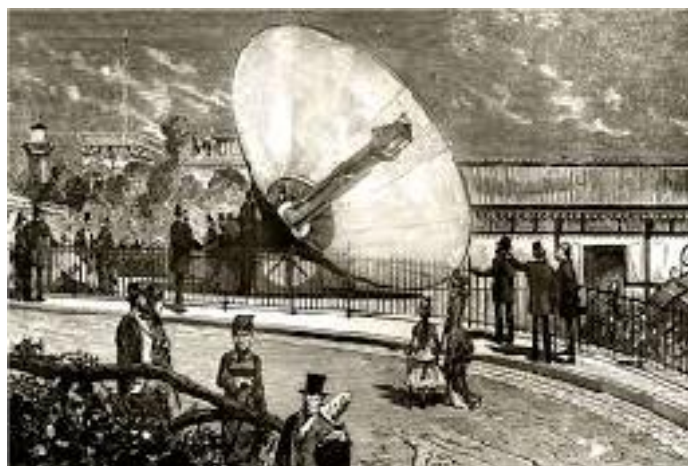
Figura 2.3 - Forno Solar de Lavoisier.



Fonte: <http://www.sciencephoto.com/media/363956/view>, acesso em 10/03/2015.

Em 1878, o matemático francês Auguste Mouchot inventou uma máquina a vapor movida à luz solar. Foi ele que disse “*Um dia, as indústrias não vão mais achar dentro da Europa os recursos para satisfazer sua pródiga expansão. O carvão, sem dúvida, vai acabar. O que a indústria vai então fazer?*”. Mouchot foi o pioneiro na tentativa de converter Energia Solar pela geração de vapor para operar as máquinas da época. O inventor usou notáveis ideias e construiu um coletor em formato de cone truncado, concentrando a luz Solar não mais em um único ponto (como o forno de Lavoisier, Figura 2.3), mas sim em uma linha focal.

Figura 2.4 - Primeiro coletor solar em larga escala, exibido por August Mouchot em 1878.



Fonte: Meinel e Meinel, 1979

A concepção do formato do coletor de Mouchot serviu para que outra invenção sua fosse conseguida, o denominado “Ciclo-Ericsson” para a conversão de Energia Solar em potência mecânica (Meinel e Meinel, 1979).

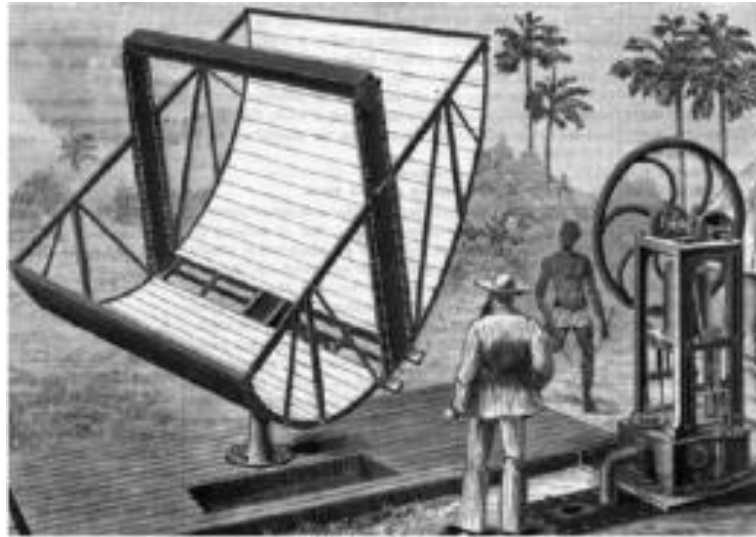
Um coletor solar calha parabólica pode utilizar como superfície refletora uma folha de alumínio na forma de um cilindro parabólico para refletir e concentrar raios solares para um tubo de receptor localizado na linha de foco do cilindro parabólico. O receptor absorve as radiações recebidas e os transforma em energia térmica, sendo este último transportado e recolhido por meio de um fluido que circula no interior do tubo receptor. Este método de concentrar energia solar tem a vantagem de alta eficiência e de baixo custo, e pode ser utilizado tanto para armazenar energia térmica, tanto para a geração de eletricidade. O coletor imaginado por Ericsson consistia em que uma calha de forma parabólica, na qual incidia os raios solares e convergiam para o seu foco, aquecendo um tubo absorvedor (Figura 2.5).

O coletor projetado e construído por Ericsson tinha uma área de abertura (área a qual os raios solares incidem) de $3,25 \text{ m}^2$ e era acoplado a um pequeno motor de 373 W de potência. Nos anos seguintes, o engenheiro aperfeiçoou o coletor modificando sua geometria visando melhorias na obtenção de energia, mas no ano de 1886 Ericsson se recusou a fornecer os detalhes técnicos do seu estudo e três anos depois ele veio a falecer não prosseguindo o seu projeto.

As próximas referências sobre os coletores solares parabólicos são do ano de 1907, da Alemanha, onde os cientistas Maier e Remshardt patentearam sua ideia. Em 1912, o engenheiro Frank Shuman, desenvolveu e instalou um grande sistema de irrigação próximo ao rio Nilo (Egito). Shuman, juntou-se ao consultor americano Charles Vernon Boys para otimizar os coletores. Eles revestiram o tubo coletor ao longo do eixo focal, onde a água era aquecida até virar vapor diretamente nos receptores e operava uma bomba com vazão máxima de $22,7 \text{ m}^3$ de água por minuto (potência de 75kW). As dimensões desse concentrador era de 62 m de comprimento e 4 m de largura (Figura 2.6).

O sistema de reflexão são os painéis para seguir o Sol, para que eles atinjam sua plena capacidade até 9 horas por dia. O tubo absorvedor tinha 9 cm de diâmetro e a taxa de concentração era cerca de 4,5, alcançando uma eficiência de aproximadamente de 40%.

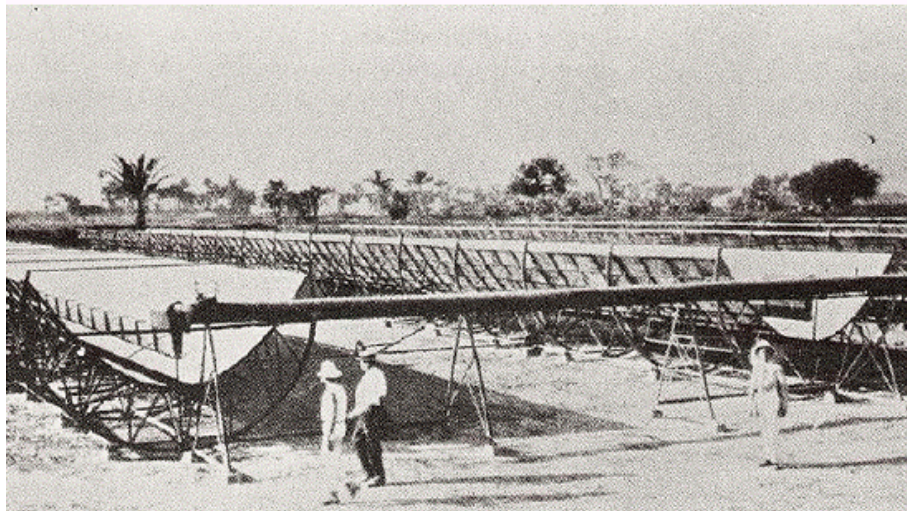
Figura 2.5 - Coletor Solar Parabólico de John Ericsson.



Fonte: CRESESB, 2012.

Os refletores que Shuman e Boys usaram, consistiam em um certo número de espelhos com um pequeno espaço entre eles para que o vento limpasse a poeira depositada nos mesmos. Mas em 1915, as plantas foram desativadas em virtude da I Guerra Mundial (Fernández García, 2010).

Figura 2.6 - Planta de irrigação – Egito.



Fonte: CRESESB, 2012

Durante os anos 50, do século passado, novas variações no dimensionamento e construção dos coletores mostraram novos meios de transferência de calor no fluido de trabalho, e duas tecnologias fazem parte dessa forma de obtenção de energia, ou seja, os coletores que convergem a radiação num só ponto (Figura 2.3) ou os que convergem em uma linha focal

(Figura 2.5). Em paralelo com isso o físico Albert Einstein, 1921, ganhava o prêmio Nobel de Física pela pesquisa sobre os efeitos fotoelétrico e em 1953 a primeira célula solar foi capaz de produzir uma corrente mensurável.

A Energia Solar, sem dúvidas foi a que impulsionou a humanidade a chegar aos dias atuais, mas tornou-se dispendiosa ao ser descoberta novas formas de aproveitamento energético. Apesar da sua grande perspectiva, o custo de produção se comparado com às energias de combustíveis fósseis é muito alto fazendo com que as indústrias e governos deem preferência a que propicie maior retorno econômico.

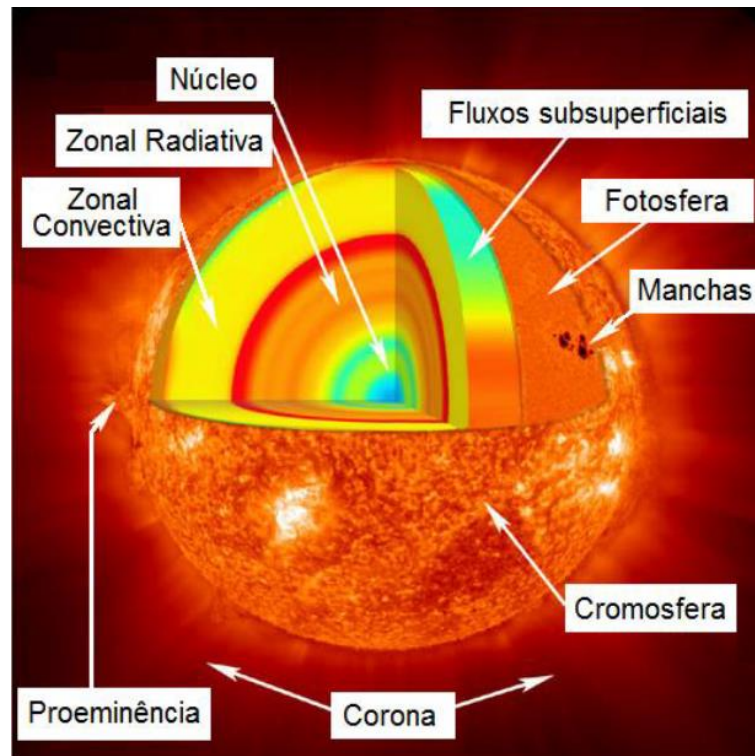
O grande desafio da Energia Solar é combater o custo-benefício com as diversas formas de energias, tornando-se mais rentável para a população, mesmo sabendo que as energias não-renováveis acabarão em um futuro próximo.

Outro ponto é que a luz Solar não incide 24 h por dia em um mesmo local, fazendo com que a absorção de energia seja reduzida. Assim, tem-se que saber aproveitar e armazenar energia para momentos noturnos, mais adiante serão apresentadas diversas formas de coletar e armazenar energia.

2.2 O Sol

Segundo Duffie (2006), o Sol é uma grande esfera com diâmetro de $1.39 \times 10^9 \text{ m}$, com uma massa de $2 \times 10^{30} \text{ kg}$ e está a uma distância de $1.495 \times 10^{11} \text{ m}$ da Terra. Ele se comporta como um corpo negro com temperatura média de 5.777 K na superfície, podendo chegar à ordem de $40 \times 10^6 \text{ K}$ no centro. A Figura 2.7 mostra uma estrutura esquemática do Sol.

Figura 2.7 - Estrutura do Sol



Fonte: Modificado de <http://sc663chenth.weebly.com/the-sun.html> acesso em 06/04/2015

Contudo, o que realmente importa é a quantidade dessa radiação que de fato chega até o planeta Terra. Assim sendo, o parâmetro mais importante ao estudo de meios de aproveitamento da energia solar, é a Constante Solar. Essa é definida como um fluxo de energia solar incidente sobre uma superfície localizada na entrada da atmosfera e orientada normalmente aos raios solares, como mostra a Figura 2.8. A mesma pode ser determinada (após algumas simplificações) usando uma abordagem de conservação da energia.

Nessa análise, toda a energia que é emitida pelo sol se propaga pelo espaço homogeneamente na forma de uma esferas concêntricas, de maneira que todas as localidades que estão a uma mesma distância do Sol receberiam a mesma quantidade de radiação. Dessa maneira, a constante solar seria a razão entre a potência emitida pelo Sol e a área superficial de uma esfera que tem o Sol como centro e tangencia o planeta Terra.

A potência emitida pelo Sol é:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \sigma T_s^4 4\pi r_s^2 \\
 &= 3.85 * 10^{26} W
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Onde:

P_s - Potência radiante do Sol;

σ – Constante de *Stefan-Boltzmann*;

T_s - Temperatura da superfície do Sol;

r_s - Raio do Sol.

A quantidade de radiação que chega ao planeta Terra é:

$$G_{SC} = \frac{P_s}{4\pi r_{SE}^2} \quad 2.2$$

$$G_{SC} = 1369 \rightarrow \approx 1367 \text{ W/m}^2$$

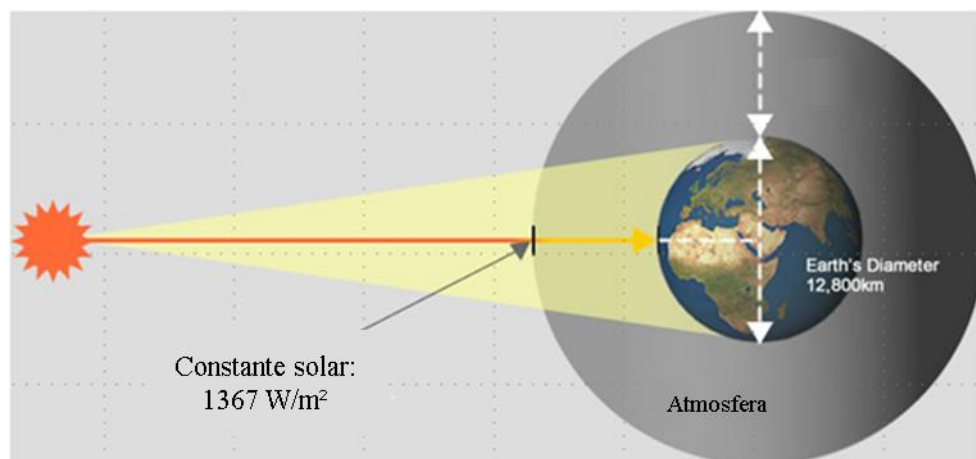
Onde:

G_{SC} - Constante solar;

r_{SE} - Distância entre o Sol e a Terra.

A partir dessa simplificação, tem-se que a constante solar é de 1369 W/m², o que é uma aproximação muito boa para o valor adotado pelo Centro Mundial de Radiação (WRC, sigla em inglês) que adota o valor 1367 W/m², com uma incerteza da ordem de 1%.

Figura 2.8 - Quantidade de radiação que incide sobre a atmosfera terrestre (Constante Solar)



Fonte: <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/extraterrestrial.php> acesso em

06/04/2015

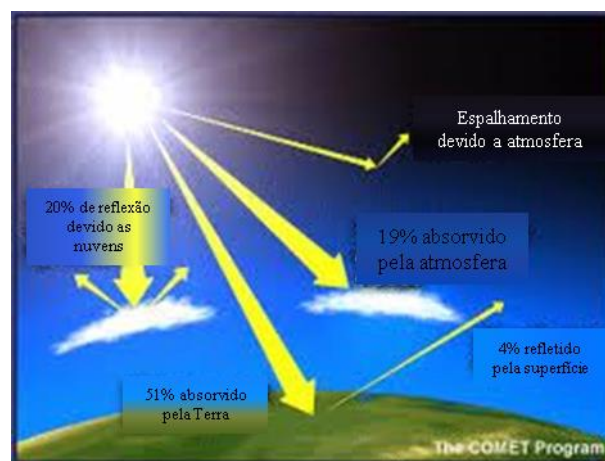
2.2.1. Energia Solar

Energia solar é toda a energia que chega até o planeta Terra via radiação (visível ou não visível) proveniente do Sol.

Como mostrado na seção anterior, essa energia entra em nossa atmosfera a uma taxa de 1367 W/m^2 , contudo nem toda essa radiação atinge a superfície da Terra. Parte dela é desviada, outra absorvida e refletida depois que essa radiação entra na atmosfera terrestre. Essas atenuações são mostradas na Figura 2.9. A partir desta figura pode-se observar os processos de atenuação da radiação solar, sendo estes: a absorção e o espalhamento (no qual a reflexão é um caso especial desse espalhamento).

A absorção é um processo pelo qual a energia do fóton é absorvida por algum anteparo que se encontra no caminho da radiação. No caso da atmosfera terrestre, a camada de ozônio absorve parte da radiação que se encontra na faixa do ultravioleta, sendo que para comprimentos de onda menores que 290 nm, a absorção é praticamente total e vai diminuindo até que em 350nm não há praticamente mais absorção. Vale salientar que esse processo de radiação é extremamente importante para os seres humanos, pois estudos comprovam que essa radiação de onda curta é um dos principais responsáveis pela surgimento de câncer de pele em pessoas que se expõem muito aos raios solares.

Figura 2.9 - Processos de atenuação da radiação solar na atmosfera terrestre.



Fonte: <https://anilkumar92.wordpress.com/2012/04/16/environment/> acesso em 05/04/2015

O espalhamento é um processo no qual a radiação solar é forçada a desviar da sua trajetória original. Esse desvio geralmente é causado pelas moléculas dos gases que compõe a atmosfera ou até mesmo por partículas de poeira que ficam dispersas nessa camada de ar.

Quando se analisa mais minuciosamente como a radiação interage com a atmosfera terrestre, observa-se que há diversos processos de absorção e espalhamento. Uma representação dos principais causadores desses processos é mostrado na Figura 2.10. Para que não se aprofundar muito nesse assunto da interação entre a radiação solar e a atmosfera (que não é o foco do presente trabalho), ênfase será dada apenas na influência das nuvens, pois a experiência mostra que esse fator é o que apresenta maior influência com relação à quantidade de radiação solar que atinge a superfície do planeta. Vale salientar, também, o efeito que essas partículas de água em suspensão têm quanto ao espalhamento da radiação solar, fenômeno que é extremamente nocivo quando se deseja trabalhar com energia solar concentrada. Assim, durante o período de análise de viabilidade técnica e econômica da instalação de uma planta de concentração, a alta incidência de nuvens é um fator proibitivo e que por muitas vezes inviabiliza a instalação de uma unidade geradora nesse local.

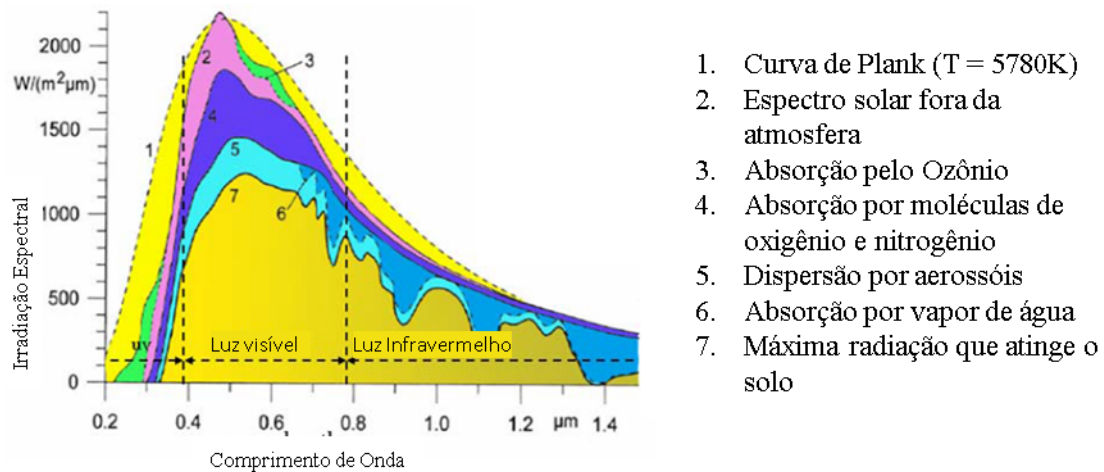
Aumentando mais uma vez o rigor da análise, podem-se observar na Figura 2.11 os efeitos mencionados anteriormente, contudo, dessa vez fazendo uma análise levando em consideração o comprimento de onda e a energia contida nesse comprimento. A partir dessa análise, percebe-se que a atenuação da radiação solar é muito forte na faixa do ultravioleta e relativamente alta na faixa do infravermelho.

Figura 2.10 - Processos de atenuação da radiação solar ao passar através da atmosfera.



Fonte: Günther (2011)

Figura 2.11 – Atenuação da potência térmica devido a fatores atmosféricos dentro do espectro da radiação solar



Fonte: Günther (2011)

Na faixa do visível, a atenuação é alta, entretanto, proporcionalmente, é bem menor do que as presentes nas duas outras faixas supracitadas. Essa análise é de suma importância, pois as propriedades dos materiais (no tocante a transferência de calor) variam bastante com relação ao comprimento de onda. Dessa maneira, conhecermos a faixa de comprimentos de onda mais energéticas é de grande valia quando se deseja extrair altas quantidades de energia térmica dessa radiação.

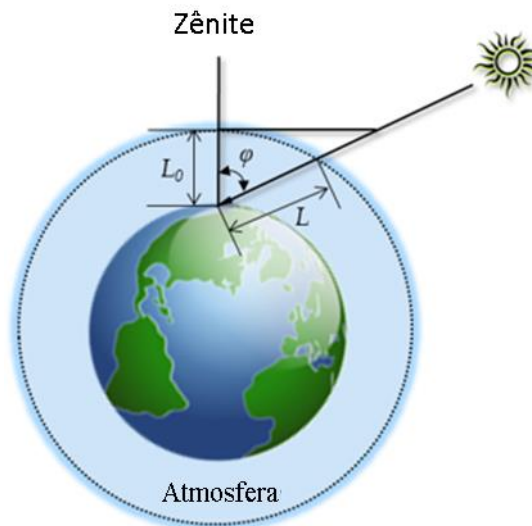
Como mencionado anteriormente, a atmosfera é um fator atenuante da radiação solar que chega até o planeta Terra. Dessa maneira é fácil inferir que, quanto maior a camada de ar a qual a radiação solar for submetida, maior a atenuação dessa radiação. Podemos observar pela Figura 2.12 que quando o ângulo “ φ ” cresce, logo maior é o caminho que a radiação solar percorre desde a entrada na atmosfera até atingir o solo, bem como maior é a atenuação a qual o mesmo é submetido. Essa análise dá origem à um fator chamado de “massa de ar relativo” que é dado pela equação:

$$AM = 1/\cos\varphi \quad 2.3$$

Assim tem-se a radiação solar incide paralelamente a ao eixo zenital e, se $AM = 2$, a radiação incidente faz um ângulo de 60° com o eixo zenital. Vale salientar que a Equação 2.4 é apenas uma aproximação, que fornece resultados muito bons para o intervalo $0^\circ \leq \varphi \leq 70^\circ$,

para valores fora desse intervalo, Kasten e Young (1989) reportam relações que permitem calcular esse fator com uma maior precisão.

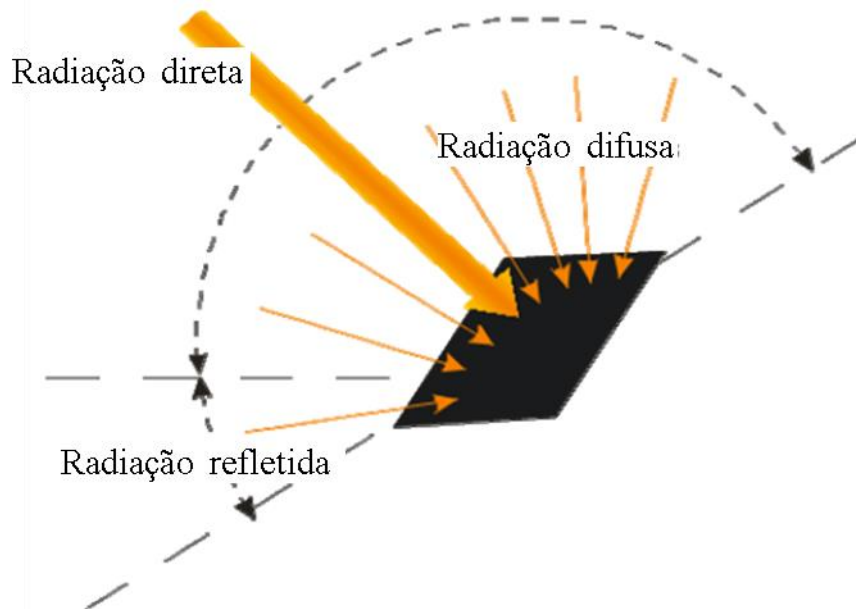
Figura 2.12 - Massa de ar relativa.



Fonte: <http://blog.concord.org/the-effect-of-air-mass-on-building-solar-performance> acesso em 06/04/2015

Assim, quando faz-se a medição da radiação no chão, o valor que se mede é composto pelas componentes diretas, as que foram desviadas da sua trajetória original e as que são emitidas pelos corpos ao redor do local onde é colocado o instrumento de medição. Como mostrado na Figura 2.13 vê-se que a radiação que é medida sobre um determinado plano é a soma das componentes direta, difusa e a radiação emitida pelo ambiente (uma vez que qualquer corpo com uma temperatura superior ao zero absoluto emite radiação).

Figura 2.13 - Componentes da radiação solar incidentes sobre uma superfície.



Fonte: Günther (2011)

A radiação direta é aquela que não sofre nenhuma mudança na sua direção desde que é emitida pelo Sol até o momento que chega até o solo. Radiação difusa é aquela que sofre mudança de direção, que geralmente é causada após entrar na atmosfera terrestre.

2.2.1.1 Radiação solar direta

O conhecimento da componente direta da radiação é particularmente importante para a utilização de coletores concentradores solar, uma vez que esses equipamentos só trabalham de maneira adequada quando estão voltados para o Sol.

A radiação direta é aquela que passa pela atmosfera e não sofre nenhum tipo de desvio ou atenuação. Quando utilizada em coletores do tipo concentradores, essa radiação é concentrada em um absorvedor.

Existem diversas maneiras de calcular o quanto a energia solar que chega ao coletor é concentrada, contudo a abordagem mais comum é a taxa de concentração por área, mostrado na Equação 2. 5.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad 2.4$$

Onde,

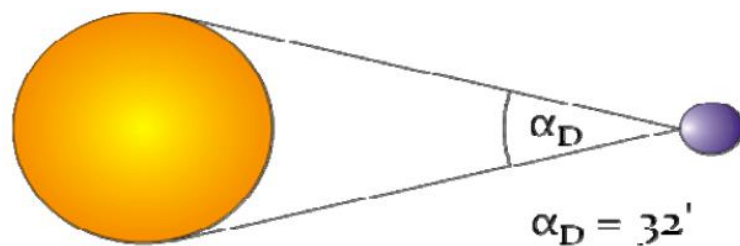
C - Taxa de Concentração por área;

A_a - Área de abertura do coletor;

A_r - Área projetada do receptor.

Mesmo não sofrendo nenhum desvio em sua trajetória, os raios solares que compõem a radiação direta não são paralelos entre si, mas apresentam uma inclinação no valor de $\theta_s = \alpha_D/2 = 0,27^\circ$, como mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Angulo de inclinação dos raios solares.



Fonte: Günther (2011)

Embora pareça insignificante, essa inclinação entre os raios traz muitas consequências quando se deseja trabalhar com energia solar concentrada. A principal delas é a taxa de concentração máxima, que, segundo Duffie (2006), para um coletor linear (como o coletor estudado na presente dissertação) é dada pela Equação 2. 5.

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{linear\ max} = \frac{1}{sen\theta_s} \quad 2.5$$

2.3 Aproveitamento da Energia Solar

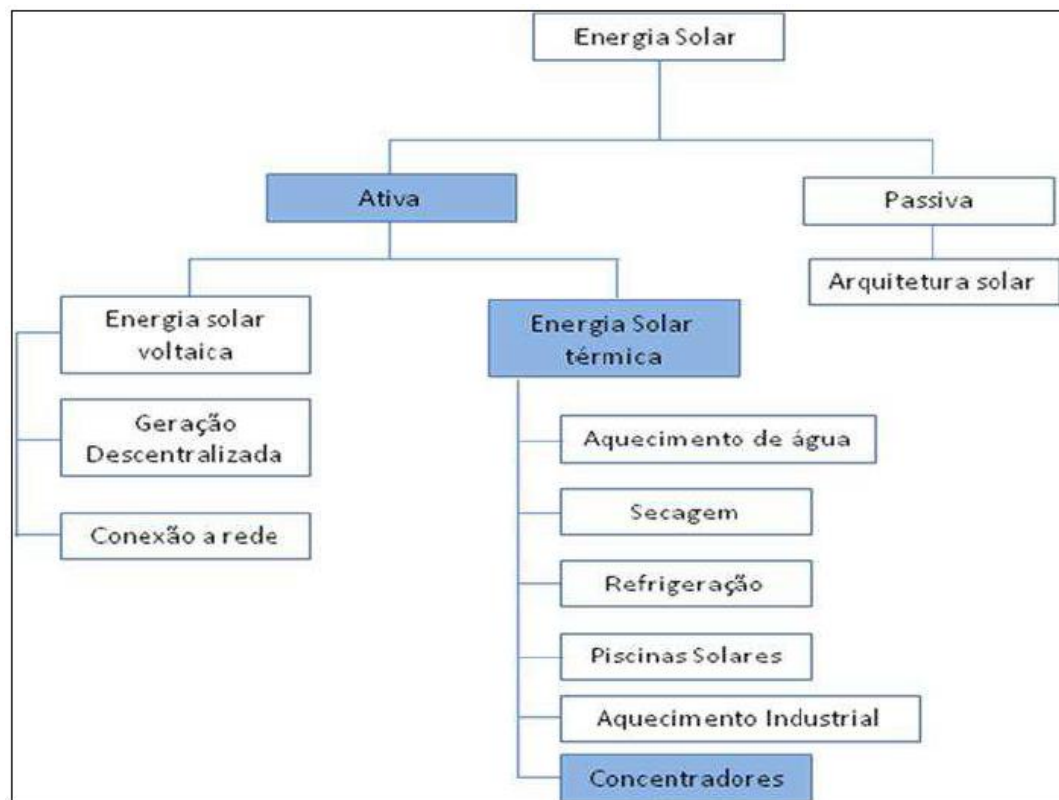
Segundo Lopez (2002), o aproveitamento da energia solar pode ocorrer de três maneiras

- Processo térmico;
- Processo elétrico;
- Processo químico.

O processo químico de conversão é realizado, por exemplo, pelas plantas que utiliza a energia solar junto de água e sais minerais para sintetizar o seu próprio alimento, assim a radiação solar é transformada em energia química. Contudo não é o foco desse trabalho estudar esse tipo de conversão.

Agora abordar-se-á um pouco sobre os processos de conversão de energia solar no tocante à processos térmicos e elétricos, como mostrado na Figura 2.15.

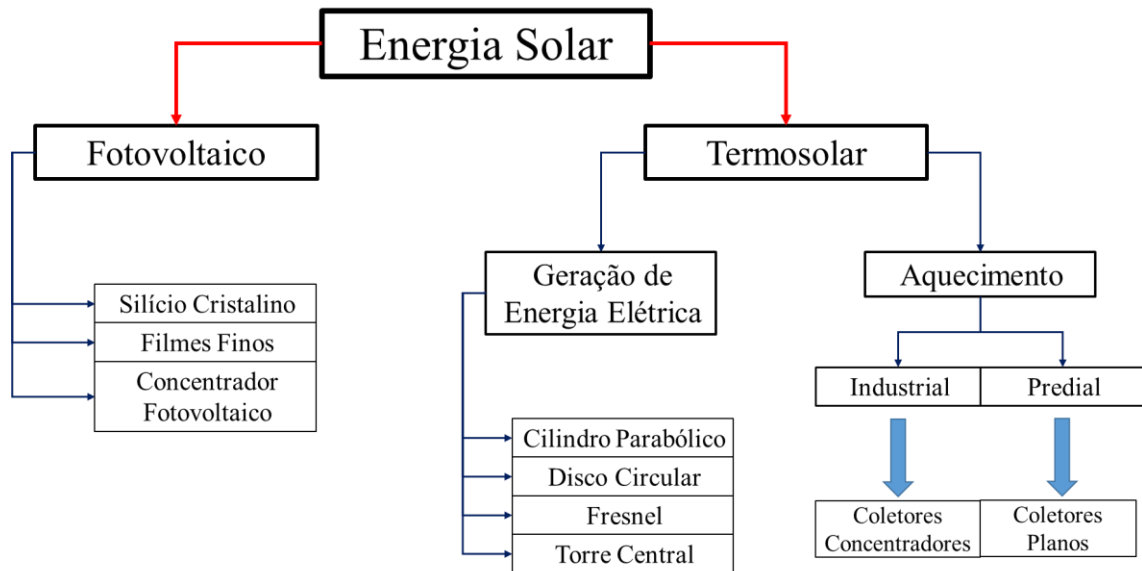
Figura 2.15 - Fluxograma das Aplicações da Energia Solar.



Fonte: BAPTISTA, ALESSANDRA SLEMAN CARDOSO, 2006

Uma outra maneira de categorizar as diversas formas de aproveitamento dessa energia e que atende de uma melhor maneira aos objetivos buscados nesta dissertação, é mostrada na Figura 2.16

Figura 2.16 – Diversas formas de aproveitamento da energia.



Fonte: Autoria própria

A partir dessa análise pode-se separar duas vertentes, que hoje são as mais usuais no mundo, a conversão fotovoltaica e a termosolar ou solar térmica. Como o objetivo desse trabalho é o aquecimento de fluido, serão analisados apenas as tecnologias termosolares para aquecimento.

2.3.2 Coletores Térmicos

Como mencionado anteriormente, existem outras maneiras de aproveitar a energia solar além dos painéis fotovoltaicos. Uma das mais usadas (embora muitos desconheçam) são os coletores térmicos. Esses coletores captam a energia térmica contida na radiação solar e a transfere para um fluido de trabalho que será posteriormente utilizado para algumas finalidades, como aquecimento de piscinas, água de banho, que requerem temperaturas entre 30 e 70°C, ou até mesmo geração de energia que requerem temperaturas de mais de 500°C.

Segundo, Kalogirou (2009), "*coletores solares são trocadores de calor que transformam radiação solar em calor. O coletor capta a radiação solar, a converte em calor, e transfere esse calor para um fluido (ar, água ou óleo em geral)*". O fluido aquecido é mantido em reservatórios termicamente isolados até o seu uso final (água aquecida para banho, ar quente para secagem de grãos, gases para acionamento de turbinas).

Os coletores podem ser estacionários ou rastreadores (que podem rastrear a luz Solar em um eixo ou em dois eixos), já que a Terra percorre uma trajetória ao redor do Sol, tornando

a incidência Solar móvel em relação a um coletor fixo. Assim, espelhando-se na flor de Girassol, os coletores rastreadores seguem a luz Solar para que ocorra o máximo de aproveitamento. Pode-se ver um comparativo entre os principais tipos de coletores solares na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Comparativo entre diversas tecnologias de coletores solares.

Motora	Coletor	Receptor	Taxa de concentração ²	Faixa de temperatura (°C)
Estacionário	solar plano	Plano	1	30 a 80
	tubular a vácuo	Plano	1	50 a 200
	parabólico composto	Tubular	1 – 5	60 a 240
			5 – 15	60 a 300
Rastreamento em 1 eixo	Refletor linear Fresnel	Tubular	10 – 40	60 a 250
	cilíndrico parabólico	Tubular	10 – 85	60 a 400
Rastreamento em 2 eixos	Disco parabólico	Pontual	600 – 2000	100 a 1500
	Heliostato (torre central)	Pontual	300 – 1500	150 a 2000

Fonte: KALOGIROU, 2009, p. 122 (adaptado)

Para conseguir essas diferenças nas temperaturas, apresentadas na Figura 2.17, varia-se a densidade com que os raios solares que chegam, atingem a superfície absorvedora. A partir desse parâmetro, e como mostrado na terceira coluna da Figura 2.17, classificam-se os coletores térmicos em dois grandes grupos: Coletores Planos e Coletores Concentradores (Tubular e Pontual).

Focando apenas nos coletores termosolares utilizados para aquecimento, eles podem ser coletores planos, quando se deseja baixas temperaturas (aquecimento de água de banho ou piscina) ou médias temperaturas (aquecimento industrial). Ambos coletores serão analisados em seguida.

2.3.2.1 Coletores Planos

Devido a sua simplicidade, foi o primeiro entre os coletores a ser utilizado. Os primeiros coletores planos começaram a ser utilizados, por volta de 1890 na Califórnia, USA.

Nessa época, os combustíveis utilizados para o aquecimento (como o gás de carvão) eram muito caros, bem como a eletricidade. Desta forma, muitas residências utilizavam aquecimento solar. Um exemplo é a cidade de Pasadena, nas proximidades de Los Angeles que, em 1897, 30% de suas casas possuíam aquecimento solar. Contudo, em 1920, foram descobertos diversas reservas de gás natural e petróleo, o que levou a diminuição nos preços desses combustíveis tornando mais cômodo a substituição dos aquecedores solares por aquecedores a base desses combustíveis; situação que perdura até os dias atuais.

Um coletor plano consiste de uma caixa isolada, que permite a absorção de parte da radiação solar (direta e difusa) que incide sobre ela, a fim de transformar essa radiação solar em calor e transferi-la para um fluido de trabalho que será utilizado em diversos processos como aquecimento de piscinas e água para uso residencial e comercial.

Figura 2.18 – Coletor solar plano.



Fonte: <http://www.himinsun.com/1-5-plate-solar-water-heater.html> (adaptado) Acesso:

12/04/2015.

Na Figura 2.18 vê-se a representação de um coletor solar, o qual tem suas principais partes descritas como segue:

- **Moldura:** Confere resistência estrutural ao coletor. Geralmente é fabricado em perfis de alumínio, chapa dobrada ou material plástico;
- **Isolamento:** Reveste a moldura com o objetivo de minimizar as perdas térmicas para o meio. Na indústria nacional, geralmente é fabricada de lã de vidro ou de rocha e espuma de poliuretano;
- **Cobertura de Vidro:** Minimiza as perdas por convecção e por radiação para o meio. Essa também pode ser fabricada com policarbonato ou acrílico;

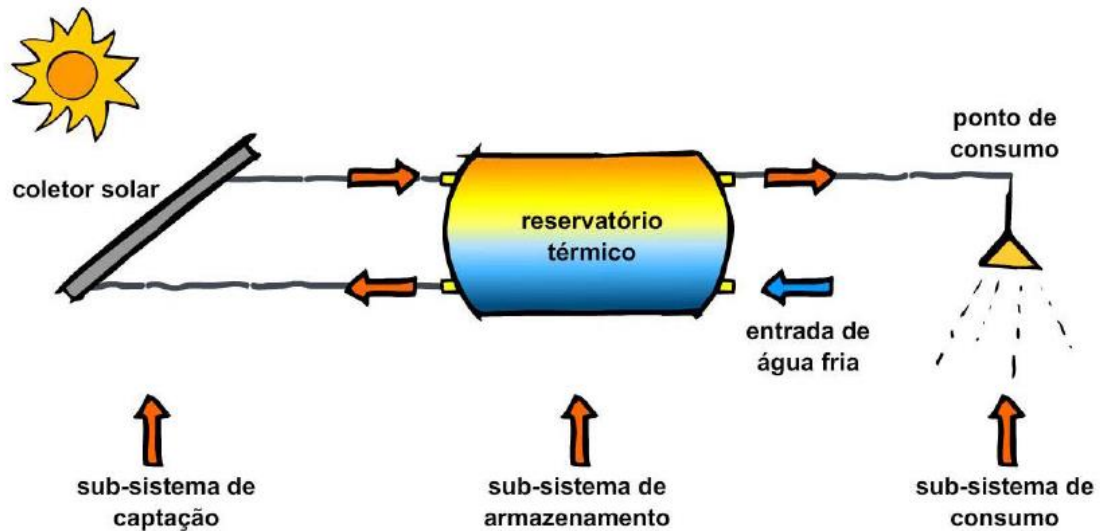
- **Tanque interno:** Armazena a água que já foi aquecida de maneira a evitar que está entre em equilíbrio térmico com o ambiente, possibilitando o uso da mesma em horas que não tenha Sol;
- **Aquecimento elétrico:** Sistema de back-up utilizado para que se tenha água quente mesmo nos dias de baixa radiação solar ou mesmo quando a demanda for mais alta do que a determinada no projeto. Geralmente esse aquecimento é feito por resistências blindadas, colocadas em contato direto com a água armazenada. O acionamento pode ser controlado automaticamente por meio de um termostato, manualmente pelo usuário;
- **Absorvedor:** Capta grande parte da radiação solar que incide sobre ele, facilitando a absorção da energia pela tubulação;
- **Tubulação:** Tubos interconectados através dos quais o fluido escoar no interior do coletor. Normalmente essa tubulação é feita de cobre devido sua elevada condutibilidade térmica e elevada resistência à corrosão;
- **Carcaça:** Tem a função de proteger o isolante de intemperes, como transporte, instalação e a umidade. Essa proteção geralmente é fabricado em alumínio, aço galvanizado ou aço carbono pintado;
- **Tanque interno:** Fica em contato com o líquido aquecido, por isso deve ser fabricado de materiais resistentes à corrosão. Geralmente é fabricado de cobre ou de aço inoxidável.

Como se pode observar na Figura 2.18, não é necessário nenhum sistema de bombeamento. A circulação da água ocorre devido a diferença de densidade da água mais aquecida que sobe, dando lugar a água mais fria que será aquecida (Fang G et al. 2010).

Ainda na Figura 2.18, vê-se que o sistema descrito conta com um back-up de energia. Esse back-up é geralmente uma resistência elétrica ou um sistema de aquecimento a gás, que é utilizado para épocas mais frias ou quando o consumo for superior ao que o sistema foi dimensionado para suprir (Li YW et al. 2007)

Ao fazer-se uma análise global do sistema, percebe-se que todo sistema termosolar usando coletores planos é composto por três grandes blocos, que são a captação, o armazenamento e o consumo. Uma representação desses três blocos é mostrada na Figura 2.19.

Figura 2.19 - Desenho esquemático de um sistema de aquecimento solar.



Fonte: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2002) apud Curso Tecnologia de Aquecimento Solar: [Noções Iniciais sobre o Aquecimento Solar](#)

Fazendo uma análise mais específica e olhando diretamente para o coletor solar, vê-se que os fluxos de energia dentro do mesmo, ocorrem como representado na Figura 2.20. A partir dessa representação, pode-se escrever a seguinte expressão do balanço de energia no coletor.

$$\text{Energia Incidente} = \left[\text{Energia Absorvida} \right] + \left[\text{Energia Transmitida} \right] + \left[\text{Energia Refletida} \right]$$

A partir dessa expressão pode-se calcular, por exemplo, a eficiência desse coletor por meio da equação:

$$\eta = Q_{\text{útil}} / (GA_{\text{ext}}) \quad 2.6$$

onde,

η – Eficiência do Coletor;

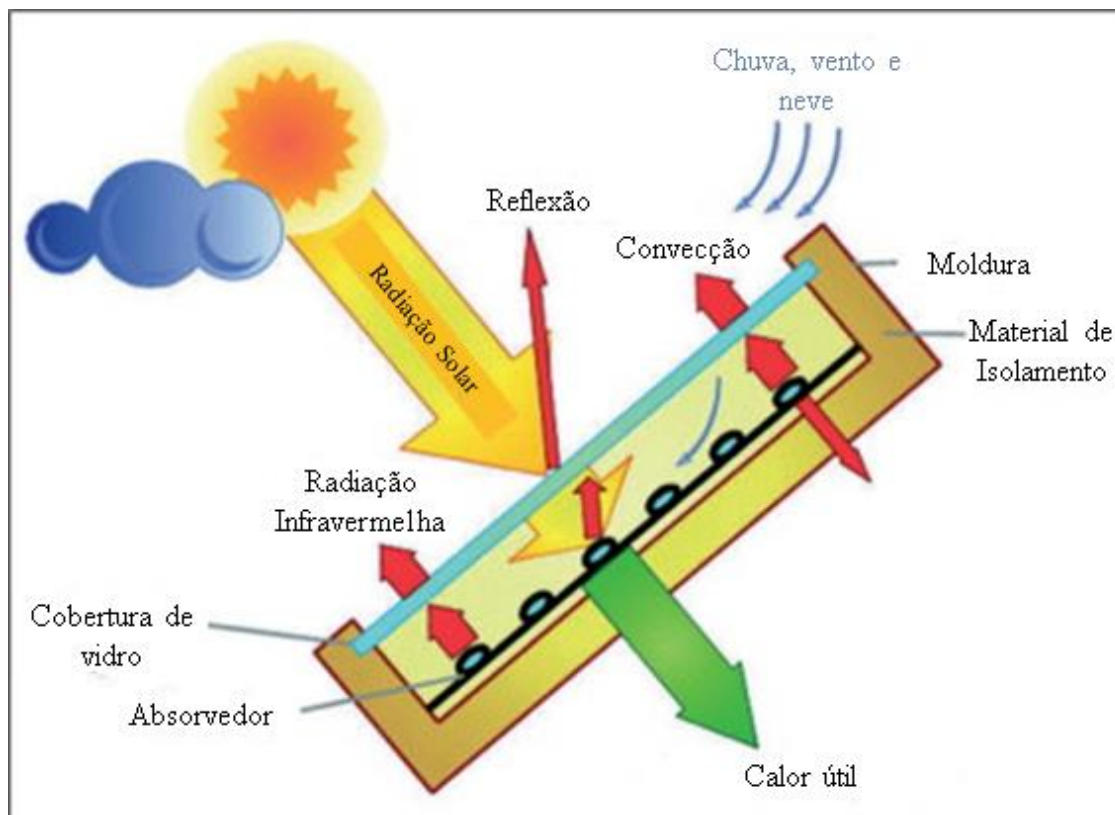
$Q_{\text{útil}}$ – Energia absorvida pelo líquido (geralmente água);

G – Irradiação solar instantânea incidente sobre o coletor (W/m^2);

A_{ext} – área externa do coletor.

Analizando os dois últimos termos da Equação 2.6 junto com a Figura 2.20, duas principais causas de perdas térmicas em coletores planos são observadas: as perdas óticas (Energia refletida) e as perdas térmicas (Energia Transmitida).

Figura 2.20 - Diagrama esquemático dos fluxos de energia no coletor solar.



Fonte: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/17067/solar-thermal-technology-update/>

Acesso em 12/04/2015

As perdas óticas estão diretamente ligadas à impossibilidade que um corpo tem de transmitir totalmente a radiação que incide sobre essa superfície, ou seja, a Transmissividade (τ) é sempre menor do que 1. Assim parte da energia solar que incide sobre o coletor é absorvida pela cobertura de vidro. Outro problema também ligado às perdas óticas é a impossibilidade do absorvedor capturar toda a energia da radiação que entra no coletor, ou seja, a absortividade (α) de uma superfície é sempre menor do que 1. Assim parte da energia que entra no coletor é refletida pelo absorvedor.

As perdas térmicas decorrem do fato que ao absorver radiação solar, o coletor solar aquece, e pela Lei do Resfriamento de Newton, quando há uma diferença de temperatura entre o corpo e o meio fluido, haverá transferência de calor por convecção que pode ser calculado segundo a Equação 2. 7.

$$q_{conv} = h_{conv}A(T_{SC} - T_{\infty}) \quad 2.7$$

Onde,

q_{conv} - Transferência de calor do Coletor Solar para o meio;

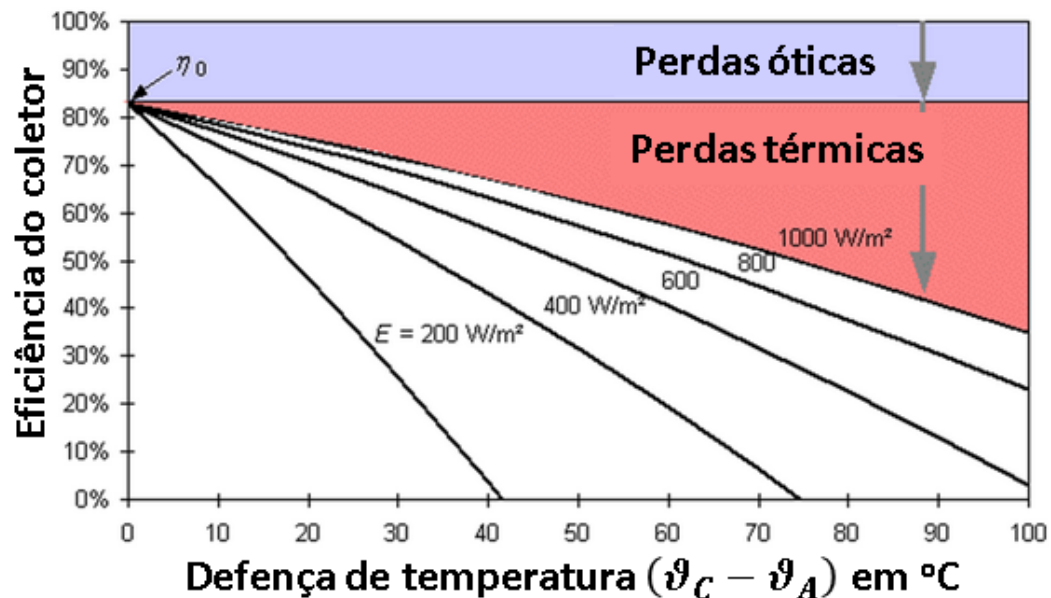
h_{conv} – Coeficiente de transferência de calor por convecção (w/m²K);

A- Área superficial do coletor;

T_{SC} - Temperatura da superfície do coletor;

T_{∞} - Temperatura do ambiente.

Figura 2.21 - Eficiência do coletor solar a diferentes irradiações e temperaturas.



Fonte: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/17067/solar-thermal-technology-update/>

Acesso em 12/04/2015

Como mencionados na introdução, esse tipo de coletor é o mais utilizado no mundo. Segundo Kalougirou, 2009, suas principais vantagens são o seu baixo custo de fabricação, sua habilidade de coletar tanto a radiação direta como a radiação difusa e o fato de funcionar em uma posição fixa (sem rastreamento solar). Somando todas essas qualidades temos um sistema barato, de fácil manutenção e com uma boa eficiência de conversão termosolar.

2.3.2.2 Coletor solar cilíndrico parabólico

Por ser o foco dessa dissertação dar-se-á uma atenção especial a esse tipo de coletor.

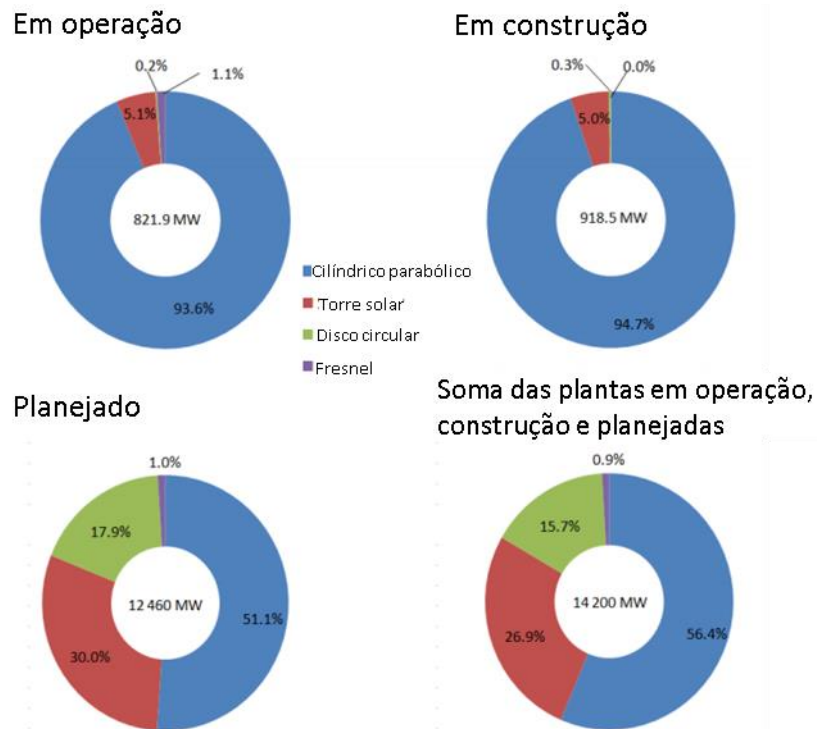
O coletor solar tipo calha parabólica é um coletor do tipo média/alta concentração, que é a tecnologia termosolar mais utilizado no mundo para a geração de eletricidade, como mostrado na Figura 2.22. Essa aplicação exige altas temperatura e por consequência altos fatores de concentração, contudo variando esse fator de concentração podemos utilizar esse coletor como fonte de calor em diversas aplicações como refrigeração (adsorção), aquecimento predial, dessalinização, entre outras.

O coletor consiste em uma superfície refletora com geometria cilíndrico-parabólica, montado sobre uma estrutura metálica, que é conectado a um dispositivo permitindo a essa superfície rastrear o Sol. No seu eixo longitudinal é colocado um tubo absorvedor de maneira que a radiação que incide perpendicularmente a esta superfície é refletida na direção do absorvedor (Kalougirou, 2009), como mostrado na Figura 2.23.

Como observa-se na descrição anterior, o coletor cilíndrico parabólico apresenta as seguintes partes principais:

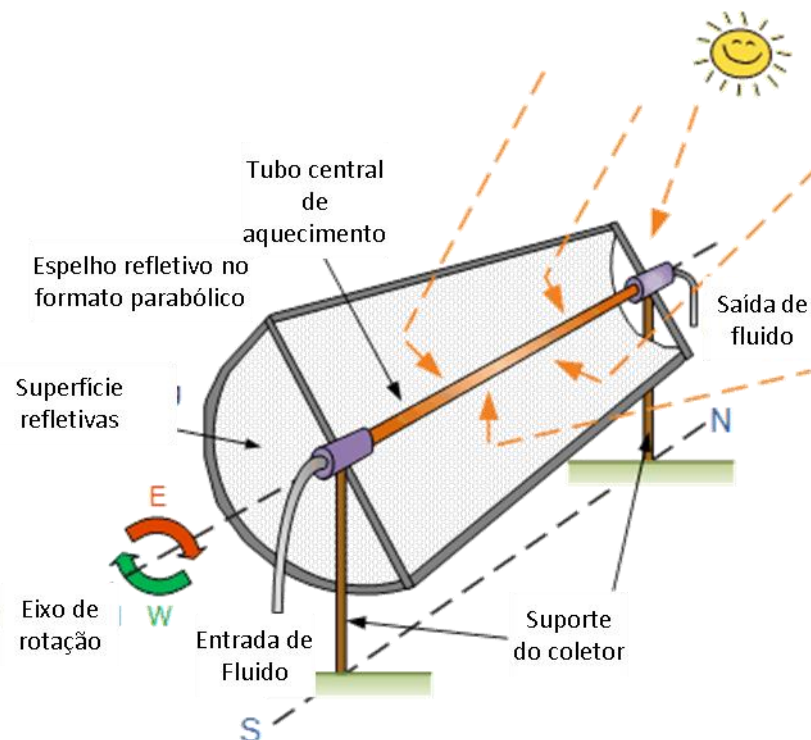
- Superfície Refletora;
- Tubo Absorvedor;
- Fluido de Transferência de Calor;
- Sistema de Rastreamento Solar;
- Sistema de Armazenamento Térmico;
- Estrutura.

Figura 2.22 - Participação do total da geração elétrica por tecnologia de coleta solar.



Fonte: adaptado de Günther, Joemann e Csambor (2011)

Figura 2.23 - Representação de coletor cilíndrico parabólico.



Fonte: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/parabolic-trough-reflector.html> (adaptado) acesso em 05/05/2015

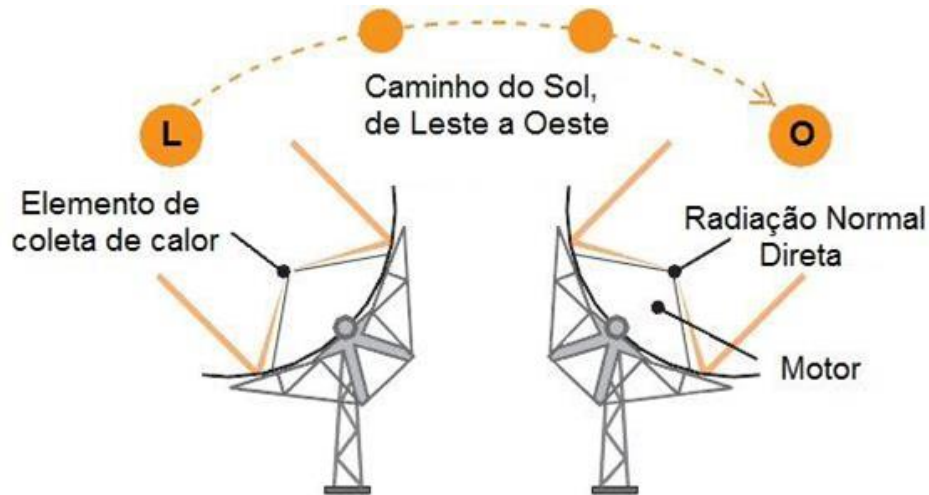
O receptor consiste de dois tubos concêntricos, sendo um interno de metal e o externo de vidro. O tubo externo tem a função de minimizar as perdas por convecção, por esse motivo o espaço anular entre os dois tubos geralmente é evacuado. O tubo interno é recoberto por uma película seletiva, geralmente de cor preta, que absorve em torno de 90% da radiação incidente sobre ele e emite pouca radiação infravermelha. (Philibert et al., 2010).

Dentro do tubo metálico circula um fluido térmico, em ciclo fechado. Durante esse trajeto, parte da energia solar absorvida é transferida para esse fluido, que mais a frente passa por um trocador de calor gerando vapor, este será posteriormente utilizado para a geração de eletricidade de acordo com um ciclo Rankine convencional (Ho, 2008). O rastreamento do coletor pode ocorrer em torno um eixo (Kalougirou, 2009). Esse eixo pode ser orientado na direção Leste-Oeste ou norte-sul.

- Direção Leste-Oeste: vai rastrear o movimento aparente diário do sol na direção norte-sul. A vantagem desta orientação é que o ajuste necessário para o rastreamento do sol durante o dia é muito menor e, ao meio-dia, a área de abertura fica totalmente apontada para o sol. No entanto, o desempenho do coletor durante o início da manhã e no final da tarde é reduzido, devido ao ângulo de incidência ser muito largo (perda por cosseno).
- Direção norte-sul: vai rastrear o movimento aparente diário do sol na direção Leste-Oeste, girando em torno de seu eixo longitudinal. Esta orientação tem maiores perdas por cosseno, principalmente ao meio-dia.

Durante o período de um ano, o coletor direcionado no sentido norte-sul absorve um pouco mais de energia que um orientado Leste-Oeste. Entretanto, o coletor norte-sul coleta mais calor no verão e menos no inverno que um Leste-Oeste, que possui uma produção de energia mais uniforme ao longo do ano. Portanto, a escolha da orientação depende também da aplicação e de quando há mais necessidade de energia, ou seja, se a demanda sofre significativa variação em função da estação do ano, inverno ou verão, ou se varia mais durante as horas do dia.

Figura 2.24 - Mecanismo de Rastreamento Solar - Leste/Oeste.



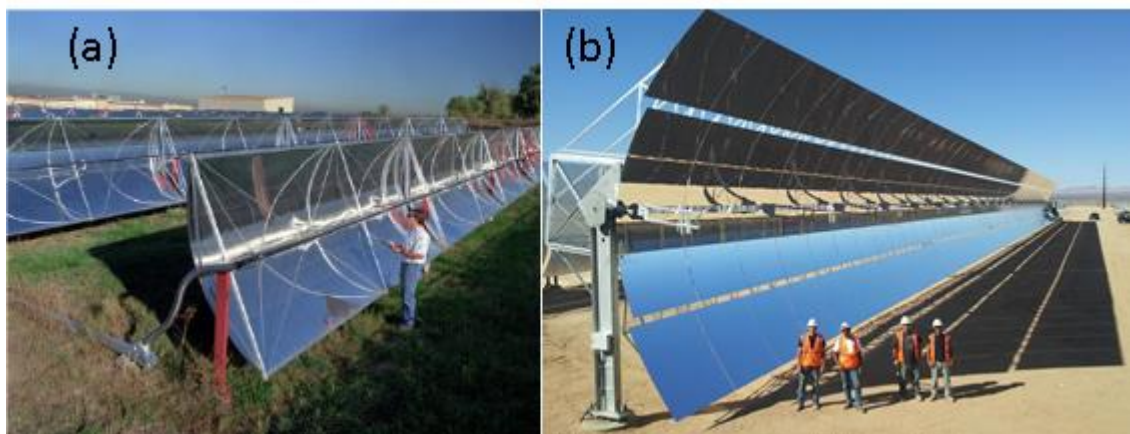
Fonte: <http://focusolar.com.br/>, acesso em 24/03/2015

O coletor de calha parabólica também pode ser definido como um refletor parabólico com o comprimento variando de 1 a 6 metros de abertura, com um tubo absorvedor fabricado de aço inox ou cobre, revestido por uma superfície seletiva e com um diâmetro entre 1,5-5 cm. Concêntrico a esse tubo fica um tubo de vidro de maior diâmetro, de forma a ter-se um “gap” entre os dois tubos de 1-2 cm (Garg e Prakash, 2008).

Segundo Fernández-García et al. (2010), os coletores de calha parabólica podem ser divididos em dois grupos. O primeiro e mais importante deles é o CSP (*Concentrated Solar Power*) que apresenta diversos coletores, já comerciais, e que foram testados com sucesso sob condições reais. As instalações mais importantes dessa tecnologia são as SEGS (Solar Energy Generating Systems), instaladas nos Estados Unidos. Essas instalações possuem coletores com 6 metros de abertura e 100-150 metros de comprimento, fator de concentração de 20-30 e temperatura de trabalho de 300 a 400°C.

Já a outra tecnologia apresenta temperatura de trabalho de 100-250°C, destinado a aplicações industriais e prediais de aquecimento e refrigeração (adsorção), abertura de 1-3 metros com 2-10 metros de comprimento e fator de concentração de 15-20. Essa diferença fica mais clara ao analisar-se a Figura 2.25.

Figura 2.25 - Comparação entre as duas principais aplicações dos coletores cilíndricos parabólicos. (a) Aquecimento industrial e predial (b) Geração de energia elétrica.



Fonte: <http://www.renewables-made-in-germany.com/en/renewables-made-in-germany/corporate-news/detail/article/ultimate-troughR-the-next-generation-collector-for-parabolic-trough-power-plants-first-demonstra.html> acesso em 01/08/2015

2.4 Escolha do Coletor a ser utilizado

A partir das cinco (05) soluções de coletores de aquecimento solar apresentados, pode-se agora realizar a escolha da melhor configuração que se adequa ao sistema de dessalinização proposto.

Inicialmente descartou-se a Torre Solar e o Disco Parabólico. Tomou-se essa decisão devido essas tecnologias não apresentarem um grau de maturidade adequado, como mostrado na Figura 2.22, além de outra desvantagem que é o tipo foco apresentado por essas tecnologias. O foco pontual leva a uma alta concentração de energia e por consequência a altíssimas temperaturas no elemento absorvedor, obrigando a utilização de ligas especiais que resistiriam a essas temperaturas, o que elevaria demais os custos do projeto e iria contra a natureza do projeto. O mesmo se propõe a um sistema de baixo custo a ser utilizado por propriedades rurais.

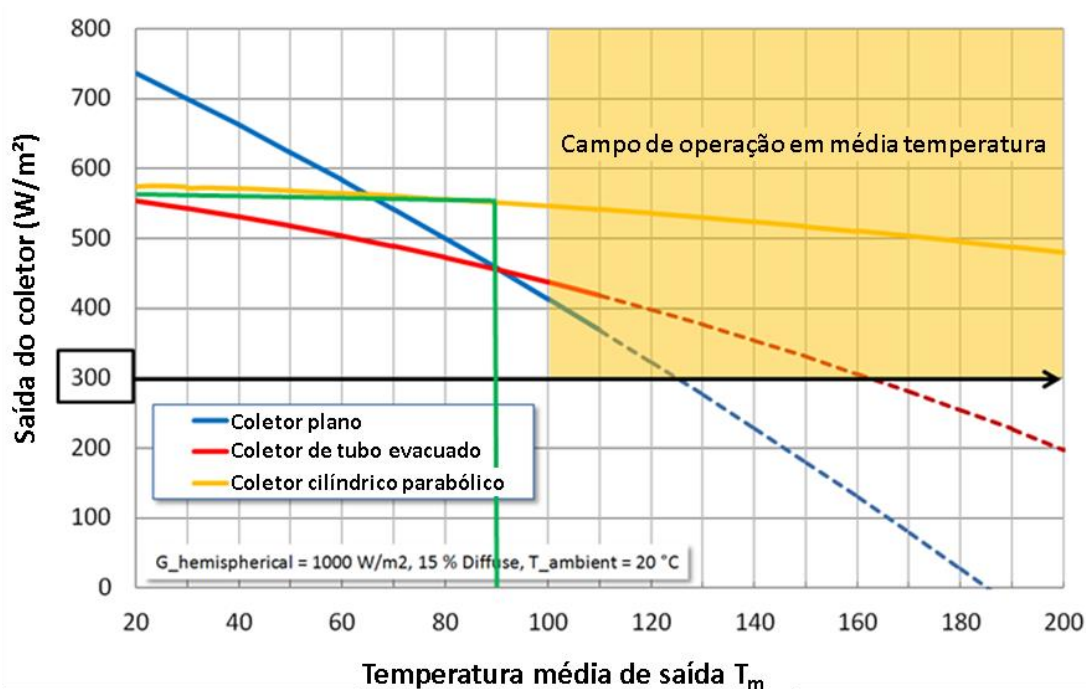
Após mais algumas análises, foi descartado também o Fresnel Linear. Essa decisão foi tomada devido à baixa maturidade tecnológica apresentada por essa tecnologia, como mostrado na Figura 2.22, bem como ao planejamento estratégico da Suna Engenharia que identificou o Coletor Solar de Calha Parabólica como sendo a tecnologia de aquecimento solar mais promissora para as suas atividades, tendo em vista o seu elevado grau de desenvolvimento tecnológico.

Após a escolha da tecnologia adequada ao interesse da pesquisa, foi identificada que a mesma apresentava dois tipos de instalações, a de média e a de alta temperatura, como mostrado na Figura 2.25. Como o objetivo da empresa era a utilização do coletor junto ao dessalinizador (baixa temperatura) e futuramente a utilização desse como uma solução de aquecimento industrial (média temperatura), optou-se pelo Coletor Solar de Calha Parabólica de pequena escala, como apresentado na Figura 2.25 (a).

Realizou-se então, uma comparação entre o Coletor Solar de Calha Parabólica e os Coletores planos. Essa comparação é de suma importância, uma vez que esses coletores planos é a tecnologia de aqueciemnto de água mais utilizada no Brasil. Essa comparação é mostrada na Figura 2.26, onde tem-se a performance de dois coletores planos usualmente comercializados no Brasil, e performance do Coletor Solar de Calha Parabólica. A partir da linha verde, percebe-se que na temperatura que será requirida pelo sistema de dessalinização dessa pesquisa, o Coletor Solar de Calha Parabólica apresenta uma melhor resposta.

Após essa análise foi decidido que seria utilizado Coletor Parabólico como fonte de calor a ser utilizado junto ao sistema de dessalinização. Após essa escolha foi aprofundado o estudo dos parâmetros envolvidos no projeto do Coletor Solar de Calha Parabólica.

Figura 2.26 - Comparação entre Coletores Solares.



Fonte:

<http://www.solarthermalworld.org/content/switzerlandprocessheatcollectorperformancetesting>

acesso em 24/04/2015

2.5 Projeto do Coletor Solar de Calha Parabólica

Como abordado anteriormente, as principais partes que compoem esse coletor são:

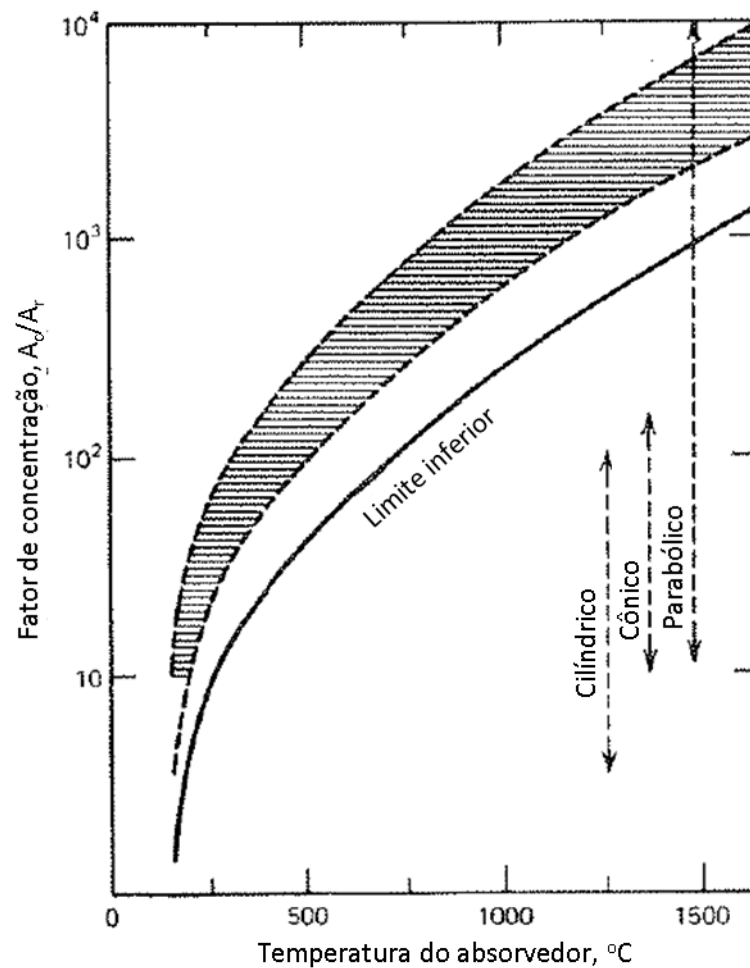
- Superfície Refletora;
- Tubo Absorvedor;
- Sistema de Rastreamento Solar;
- Estrutura do Coletor
- Fluido de Transferência de Calor;
- Sistema de Armazenamento Térmico.

Contudo nessa dissertação abordar-se-á apenas os quatro primeiros tópicos. Não será discutido o fluido de transferência de calor, pois esse já está estabelecido e será a água. Quanto ao Sistema de Armazenamento Térmico, esse necessita de um projeto específico que identifique quais suas variáveis construtivas e quais seus principais gargalos.

2.5.1 Superfície Refletora

A Superfície Refletora é a parte responsável por coletar a radiação solar e concentrá-la em uma linha focal, onde será absorvida e utilizada no processo. Geralmente essa superfície tem a sua seção transversal na forma de uma parábola, podendo também assumir outras geometrias, dependendo do fator de concentração desejado. Essa relação entre a geometria e o fator de concentração é apresentada na Figura 2.27.

Figura 2.27- Relação entre o Fator de Concentração e a temperatura atingida na saída do coletor.



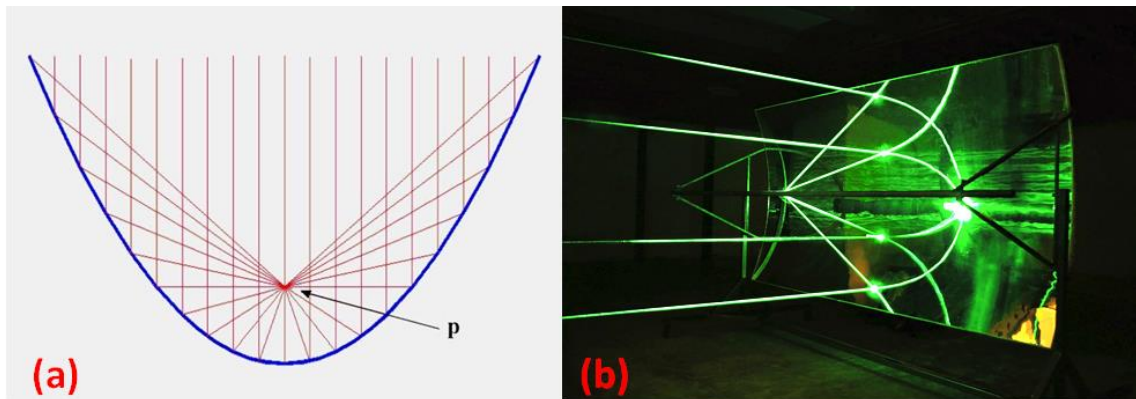
Fonte: Duffie, 2006

Embora possam existir diversas geometrias, aqui falar-se-á apenas da forma parabólica, uma vez que ela é a mais usada e como vê-se na Figura 2.27, é a que permite a maior variação de temperaturas de trabalho. Vê-se que existem algumas variáveis geométricas que devem ser compreendidas para que se possa entender melhor esse tipo de coletor.

2.5.1.1 Variáveis Geométricas

A superfície parabólica possui uma linha focal, de tal maneira que toda a radiação que incidir perpendicularmente a área projetada do coletor, será refletida para essa linha, como mostra a Figura 2.28.

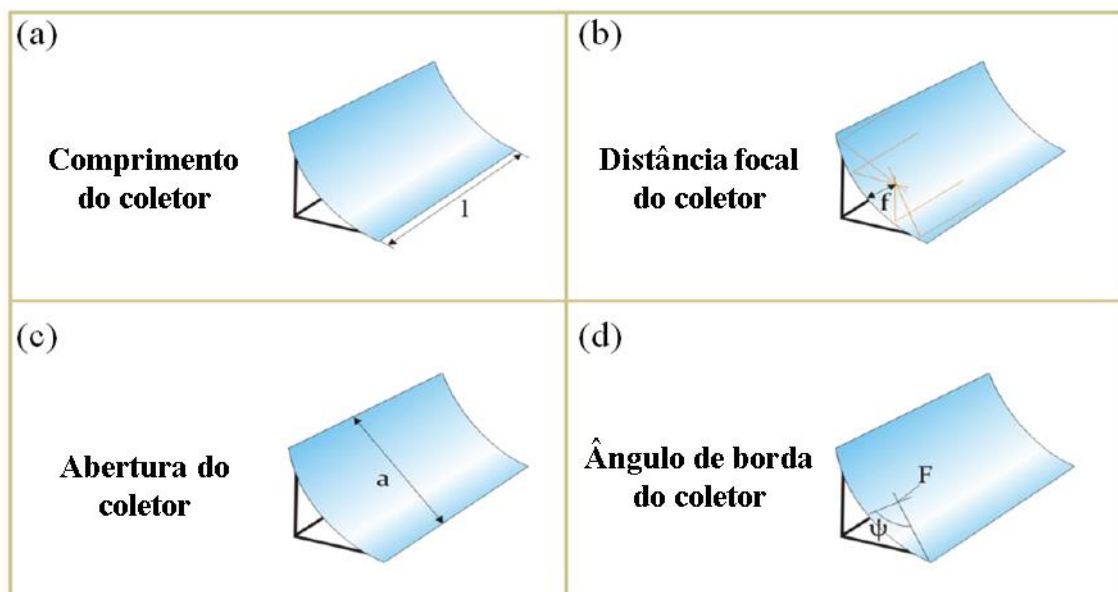
Figura 2.28 - (a) Representação da reflexão em uma parábola, (b) Teste realizado na superfície refletora de um coletor cilíndrico parabólico.



Fonte: <http://www.helioclim.fr/technologies/> acesso em 25/03/2015

Observando a Figura 2.29, vê-se os principais parâmetros geométricos quando deseja-se projetar um Coletor Parabólico. O correto entendimento desses parâmetros permite o projeto consciente de maneira a atender tanto aos requisitos técnicos quanto aos requisitos econômicos desejados para o projeto.

Figura 2.29 - Parâmetros geométricos do coletor cilíndrico parabólico.



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

O primeiro parâmetro geométrico mostrado na Figura 2.29 (a) é o comprimento do coletor. Vale salientar que não fala-se do comprimento de toda a instalação que geralmente tem

mais de uma centena de metros, mas sim do comprimento de um único módulo que será replicado várias vezes a fim de formar a instalação. Esse comprimento deve ser determinado a partir de uma análise técnica e econômica cuidadosa, uma vez que se o dimensionamento for realizado para menos (o módulo ficar pequeno) acarretará um aumento do custo tanto na fabricação quanto na instalação, já se ocorrer do mesmo ficar muito grande pode sofrer deformações o que diminuirá as suas propriedades óticas, causando uma diminuição na eficiência do sistema.

Ao analisar-se a Figura 2.28 (a) vê-se que a geometria tem um foco, isso pode ser demonstrado considerando que a parábola segue uma equação do tipo $y = px^2$ e após algumas relações trigonométricas entre as linhas de radiação incidentes e a curva da parábola pode-se demonstrar que:

$$y = \left(\frac{1}{4f}\right)x^2 \quad 2.8$$

onde “ f ” é a distância focal (distância do vértice ao foco da parábola). A distância focal está mostrada na Figura 2.29 (b).

Outro parâmetro é o ângulo de borda, que é o ângulo formado entre o segmento de reta que une o vértice ao foco e une o foco à extremidade da constela. Esse ângulo é representado na Figura 2.29 (d).

Como último parâmetro, tem-se a abertura do coletor que, como vê-se na Figura 2.29 (c), é a distância entre as duas bordas da seção transversal do coletor. Quando fala-se em grandes instalações de coletores para a geração de energia elétrica, a abertura do coletor é, em torno, de 6 metros, já para coletores menores (geralmente utilizados no fornecimento de calor para processos industriais), a abertura varia de 1 a 3 metros.

As três últimas variáveis referentes a seção transversal do coletor podem ser correlacionadas de maneira a descrever completamente a seção transversal da superfície refletora. Essa relação é dada pela equação:

$$\tan\psi = \frac{\left(a/f\right)}{2^{(1/8)}\left(a/f\right)^2} \quad 2.9$$

onde,

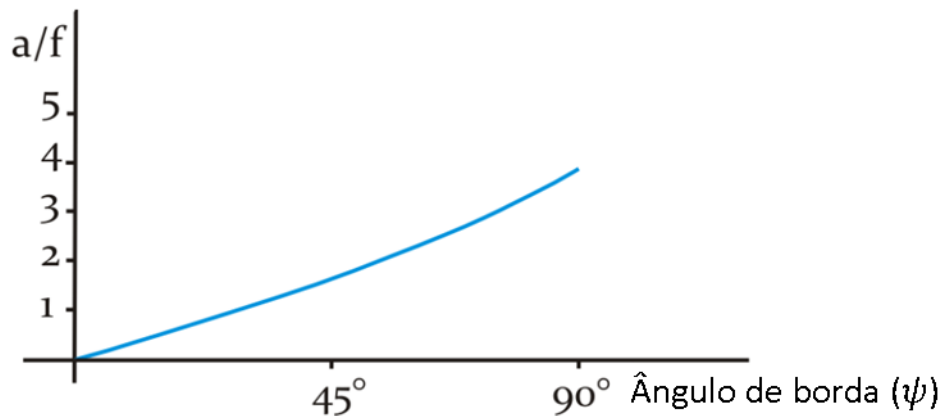
ψ – Ângulo de borda;
 a – Comprimento de abertura;
 f – distância focal.

Colocando tudo em função do ângulo de borda, pode-se escrever:

$$a/f = -\frac{4}{\tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2\psi} + 16} \quad 2.10$$

O gráfico representativo da equação 2.10 pode ser observado na Figura 2.30

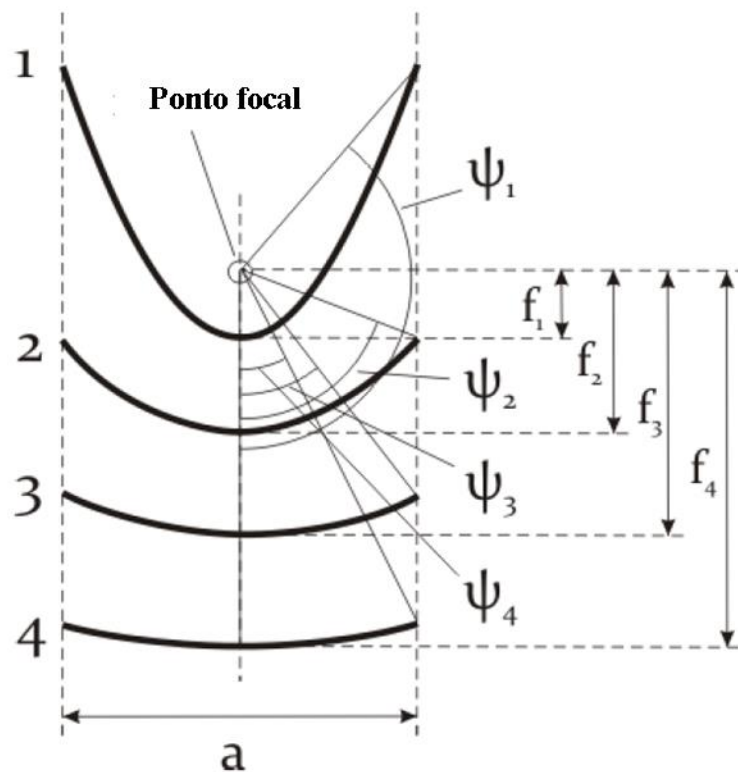
Figura 2.30 - Relação entre o ângulo de borda e a relação (a/f).



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

Na Figura 2.31 analisa-se as influências dessas três últimas variáveis geométricas na eficiência do coletor. Mantive-se a abertura constante, porque a sua influência na energia térmica coletada se dá numa relação direta com área de abertura do coletor. Para as duas outras, considerando um espelho preciso, se o ângulo de borda é pequeno, ou muito grande, tem-se que o raio solar percorre uma grande distância até atingir o tubo coletor, havendo assim um maior espalhamento, e a necessidade de trabalhar-se com maiores diâmetros para o tubo coletor.

Figura 2.31 - Relação entre a distância focal e o ângulo de borda para um mesma abertura.



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

Considerando um coletor com a mesma abertura, um menor ângulo de borda, leva a maiores fatores de concentração, além de coletarem a mesma quantidade de energia solar com um menor comprimento de superfície refletora, embora maiores ângulos de borda (maiores que 90°) evitem de o tubo coletor ficar diretamente exposto ao ar ambiente, assim diminuindo as perdas por convecção.

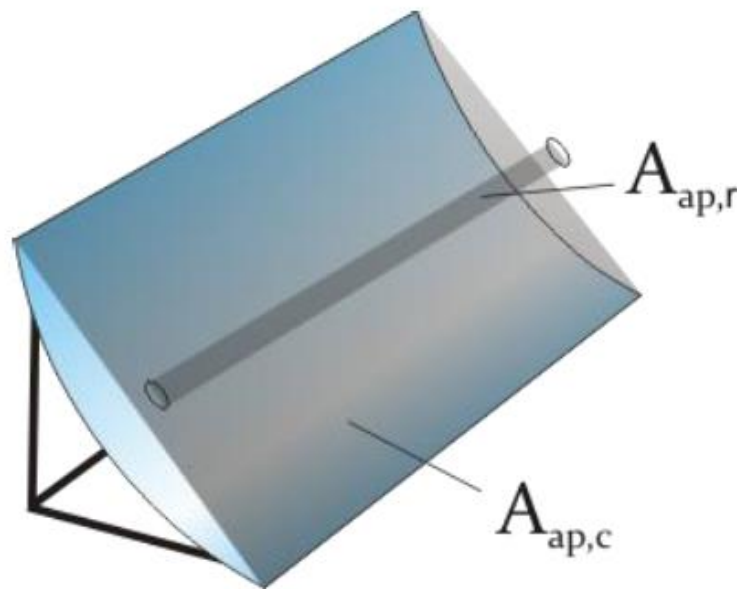
Observando a Figura 2.31, agora considerando que a superfície refletora não é perfeita (como na prática realmente não é), tem-se que o efeito dessas imperfeições aumenta proporcionalmente à distância percorrida pela radiação solar desde a reflexão até interceptar o tubo absorvedor. Dessa maneira ângulos de bordas pequenos ou muito grandes devem ser evitados a fim de diminuir o fator de interceptação do coletor, assim diminuindo drasticamente a sua eficiência.

Pode-se ainda fazer uma análise econômica, uma vez que para grandes ângulos de borda, as extremidades do coletor contribuem muito pouco para o montante da energia coletada. Isso significa um aumento nos custos que trazem pouco na captação de energia.

Assim de maneira geral, as melhores práticas recomendam ângulos de borda em torno de 80°.

Durante o projeto e dimensionamento de campo de coletores, o parâmetro mais utilizado é a área de abertura do coletor, uma vez que esse parâmetro mensura a quantidade de energia solar que será coletada naquela instalação. Uma representação da área de abertura é mostrado na Figura 2.32.

Figura 2.32 - Representação da área de abertura do coletor.



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

A área do coletor é dada pela Equação 2. 11.

$$A_{ap} = al \quad 2.11$$

Caso deseje-se determinar a quantidade de material necessário para confeccionar a superfície, pode-se utilizar a Equação 2. 12.

$$A = \left(\frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2f \ln \left(\frac{a}{4f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) l \quad 2.12$$

2.5.1.2 Material Refletivo

A superfície refletiva deve ser fabricada utilizando-se material que permita a ela desviar os raios solares e concentrá-lo em uma linha focal. Para isso, ela precisa ter um alta refletividade para o comprimento de onda apresentado pela radiação que incide sobre ela (nesse caso a radiação solar) e para essa radiação ela deve apresentar uma reflexão regular para aquele comprimento de onda, ou seja, a superfície refletiva não deve causar um espalhamento da radiação que reflete.

Durante os últimos 30 anos foram desenvolvidos algumas soluções para obter essas duas características. Atualmente as principais soluções são mostradas abaixo.

2.5.1.2.1 Espelho de vidro revestido com prata

Essa é a solução mais usual para superfícies refletivas. De fato, a maior parte das instalações comerciais que utilizam a tecnologia de espelho parabólico utiliza esse tipo de superfície refletora, um exemplo é mostrado na Figura 2.33.

Figura 2.33 - Montagem de um coletor cilíndrico parabólico.



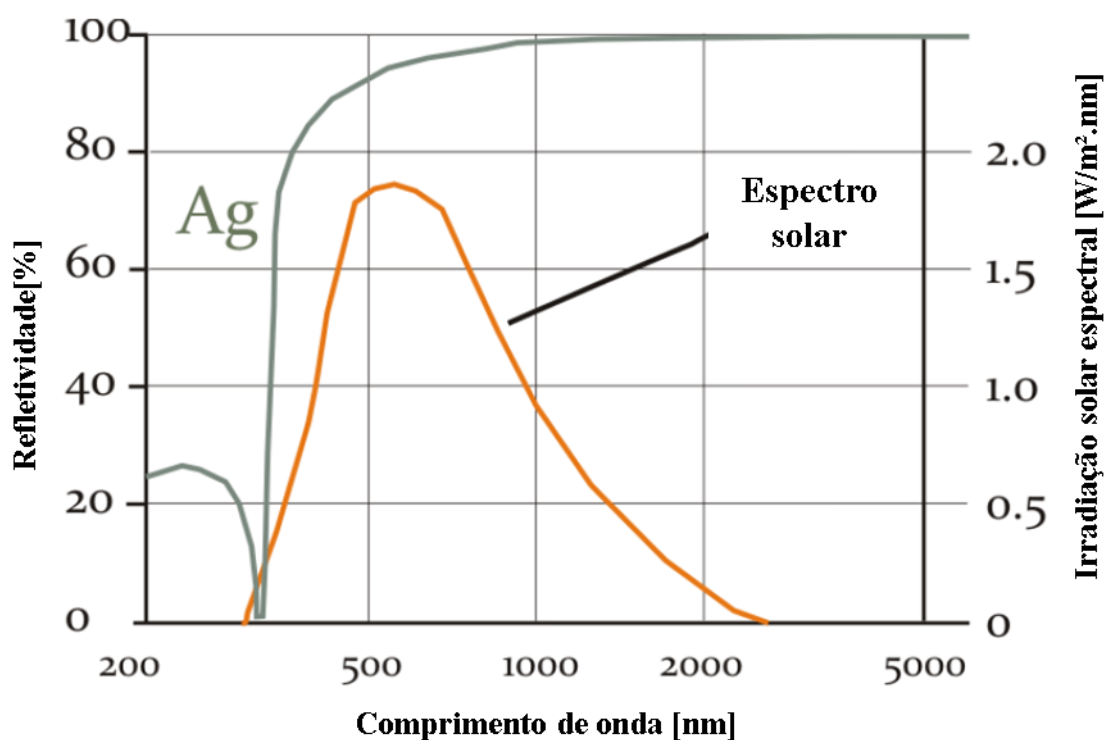
Fonte: site: http://www.volker-quaschning.de/fotos/re-spanien/Rinne-Aufbau2_1024x768.jpg

acesso em 05/05/2015

Esse tipo de superfície apresenta diversas vantagens, como uma excelente precisão, conseguida a partir da padronização e qualidade conseguidos em seu processo de fabricação, além de apresentarem elevada vida útil, reconhecida por meio de testes realizados após 10 anos de uso e que não acusaram nenhuma redução significativa na sua refletividade. Essas duas características juntas conferem à superfície refletiva um ótimo fator de interceptação.

A alta refletividade presente nessas superfícies é conseguida por meio de uma camada de prata que é depositada em sua superfície, como pode-se ver pela Figura 2.34

Figura 2.34 - Refletividade da camada de Prata (Ag).



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

Entretanto essa solução está mais adequada a grandes instalações geradoras de energia, não sendo economicamente viável para a utilização em instalações de pequeno porte. Para essas pequenas instalações existem basicamente duas soluções, que são as chapas finas e os filmes refletivos.

2.5.1.2.2 Filmes refletivos

Nos anos 90, a NREL (National Renewable Energy Laboratory), laboratório mantido pelo governo americano que se dedica a estudar energias renováveis, desenvolveu uma película

refletora recoberta por prata e que atualmente apresenta o nome comercial de ReflecTech, mostrado na Figura 2.35.

Figura 2.35 - Película refletiva ReflecTech.



Site: https://www.fusionuv.com/UV_Curing_Enabling_Technology.aspx acesso em

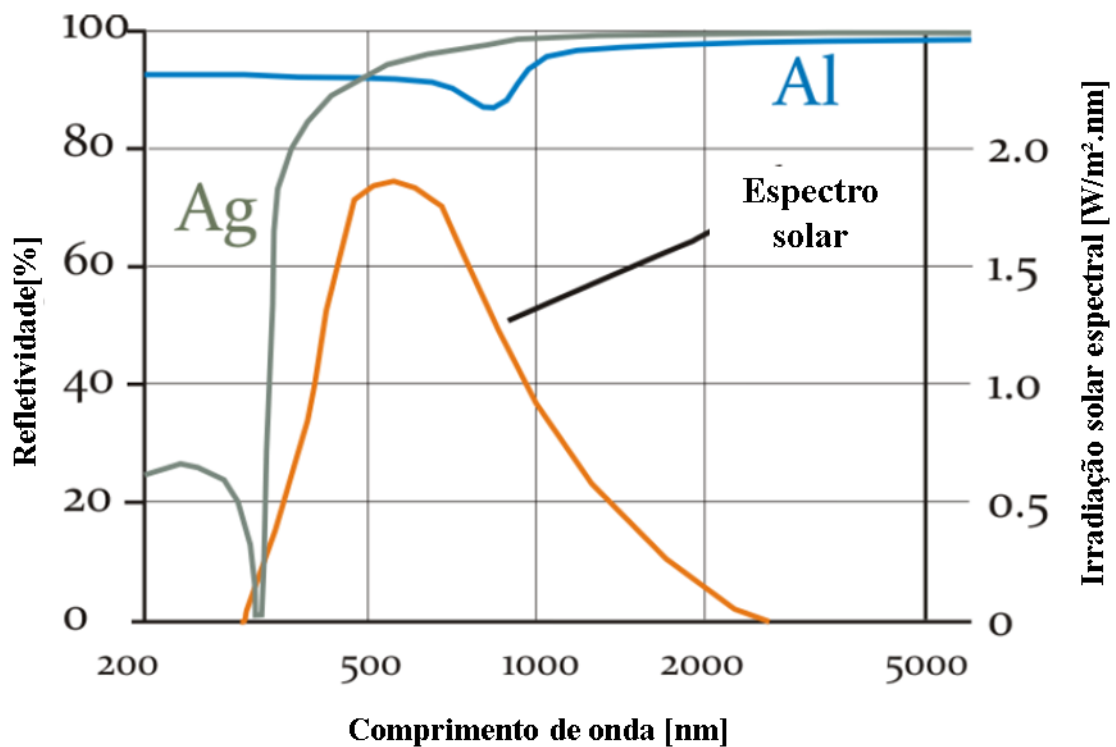
05/05/2015

A utilização de películas refletoras reduz bastante os custos de fabricação quando comparado com os espelhos, principalmente pelo fato de ele poder ser aplicado sobre vários tipos de superfície (desde que não seja porosa) que posteriormente será moldada sobre a estrutura do coletor. Isto evita todo o custo com processos de fabricação complexos e transporte delicado, sendo custos inerentes a escolha do espelho de vidro.

2.5.1.2.3 Chapas finas

Essa é a solução mais barata quando se fala em superfície refletora. A mesma consiste em utilizar chapas finas de materiais metálicos, submete-los ao processo de polimento, de maneira a aumentar a sua refletividade. A principal desvantagem dessa opção é a falta de resultados conclusivos de testes de longa duração, embora tenha se resultados muito bons a partir do uso de aço inox polido e de alumínio refletivo.

Figura 2.36 - Comparação da refletividade do alumínio com o da prata para o comprimento de onda da radiação solar.



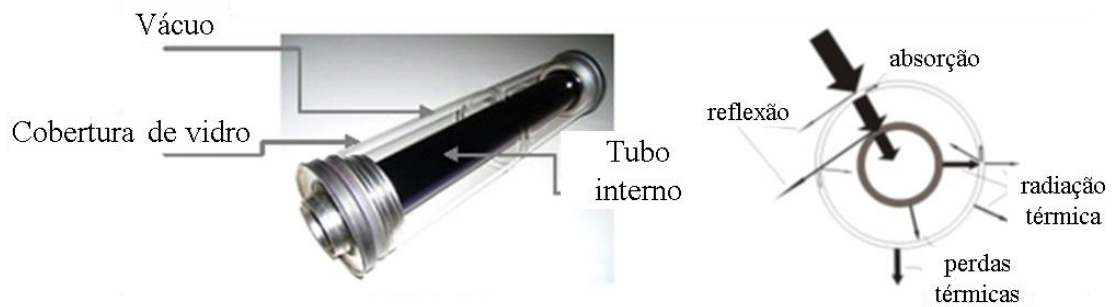
Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

2.5.2 Tubo absorvedor

O tubo absorvedor é o elemento responsável por absorver a radiação que é refletida pela superfície refletora. Os duas principais características que esse elemento deve possuir é o de apresentar uma elevada absortividade para comprimentos de onda apresentados pela energia solar e uma baixa emissividade de radiação dentro da faixa do infravermelho, levando assim a pouca perda de energia do tubo para o ambiente.

As principais partes que devem ser levadas em consideração ao se estudar um tubo absorvedor são: Tube metálico, tubo transparente e o Espaço anular entre esses dois tubos. Uma imagem de um tubo absorvedor é mostrada na Figura 2.37. Nos próximos tópicos analisar-se-á melhor cada uma dessas partes.

Figura 2.37 - Principais partes de um tubo absorvedor.



Fonte: <http://www.shamspower.ae/en/the-project/factsheets/absorber-tubes/> acesso em 05/05/2015

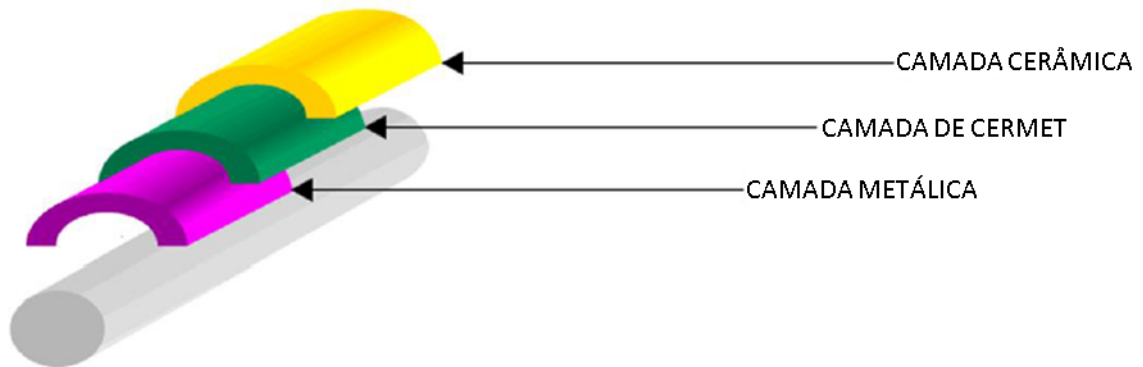
2.5.2.1 Tubo metálico

Esse elemento do tubo absorvedor é responsável por absorver a radiação que é refletida pela superfície refletora e ceder esse calor ao fluido que circula no seu interior. Para que consiga desempenhar essa função, esse tubo deve apresentar uma elevada absorvidade nos comprimentos de onda próximos a faixa do visível e apresentar baixa emissividade para comprimentos de onda dentro da faixa do ultra violeta. Além disso deve apresentar alta durabilidade, uma vez que o sistema será submetido a condições severas de operação.

Pela Lei de Kichoff da radiação, percebe-se que $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Assim deve-se observar que tanto a absorvidade quanto a emissividade são função da temperatura de trabalho do tubo. Como a temperatura correlacionada com a absorvidade é a temperatura do Sol e a relacionada a emissividade é a temperatura do tubo, sempre haverá diferença entre as essas características. Assim a situação ideal é que, fazendo uma análise termodinâmica, seja aquele em que o tubo absorve muito e emite pouco naquela condição de operação na qual se encontra.

Essas características muito raramente coexistem em um mesmo material e mesmo quando isso ocorre, o preço é proibitivo, por esse motivo a solução mais usual é a deposição de uma superfície seletiva sobre um tubo metálico. Nessa configuração, tanto o tubo deve apresentar alta durabilidade quanto a superfície deve apresentar as características térmicas. Uma representação é mostrado na Figura 2.38.

Figura 2.38 - Superfície absorvedora formada por multicamadas



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

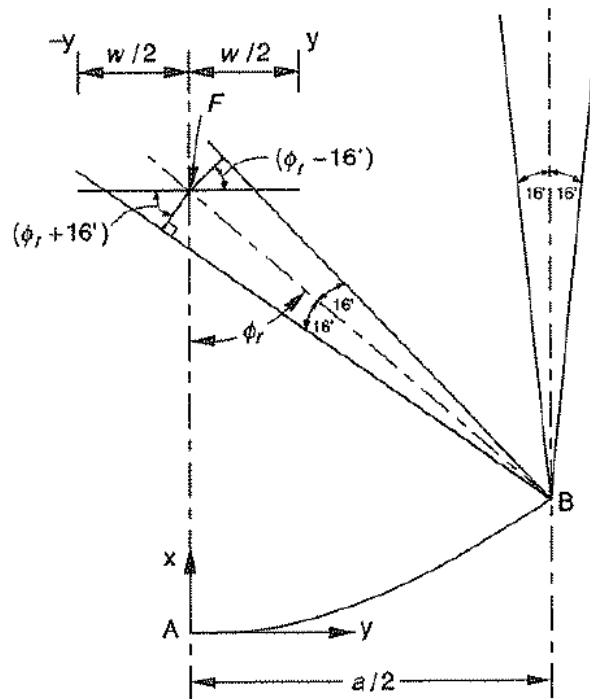
A superfície do coletor é idealizada como seletiva. Esta característica engloba apresentar seletividade maior que 5.67, absorvância solar maior que 85% e emitância térmica menor que 15% (Dornelles, 2011). Quando o fator de seletividade for maior que 10 a superfície é considerada altamente seletiva (Sade (2011) apud Krenzinger (1979)).

O projeto de superfície seletiva é uma atividade de elevada complexidade onde devem ser levados em consideração aspectos físicos, químicos e térmicos. Bem como todos os fatores envolvidos na sua utilização.

Um outro fator intimamente ligado ao diâmetro do tubo absorvedor e que impacta na eficiência global do Coletor é o fator de interceptação. Esse fator pode ser entendido como a parcela da radiação solar refletida que efetivamente interceptam o tubo metálico. Dessa maneira, quanto maior o diâmetro do tubo, maior o fator de interceptação, contudo esses grandes diâmetros encarecem o sistema de absorção, bem como aumentam as perdas térmicas para o ambiente. Assim deve-se determinar qual o diâmetro adequado para o tubo metálico.

Para efetuar-se esse cálculo temos que estar cientes que mesmo a radiação solar direta não apresenta raios solares paralelos entre si, como mostrado na Figura 2.39.

Figura 2.39- Representação da radiação solar quando refletida pelo coletor cilíndrico parabólico.

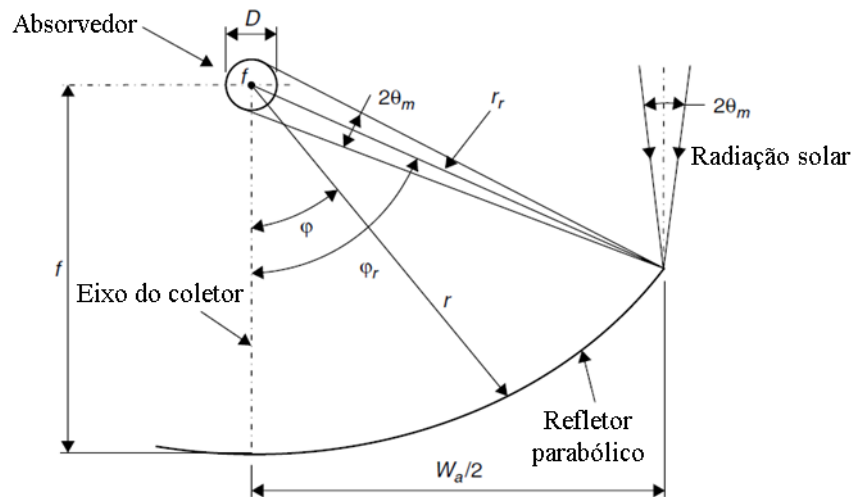


Fonte: Duffie (2006)

Uma das maneiras de dimensionar esse componente é a de determinar a abertura entre os raios solares quando refletidos da maior distância entre o tubo absorvedor e a superfície refletora. Esse dimensionamento pode ser observado na Figura 2.40. Por relações trigonométricas podemos determinar que o diâmetro do tubo metálico, pode ser determinado pela expressão:

$$D = 2r_r \sin(\theta_m)$$

Figura 2.40 -Determinação do diâmetro externo do tubo metálico



Fonte: Kalougrinou (2009)

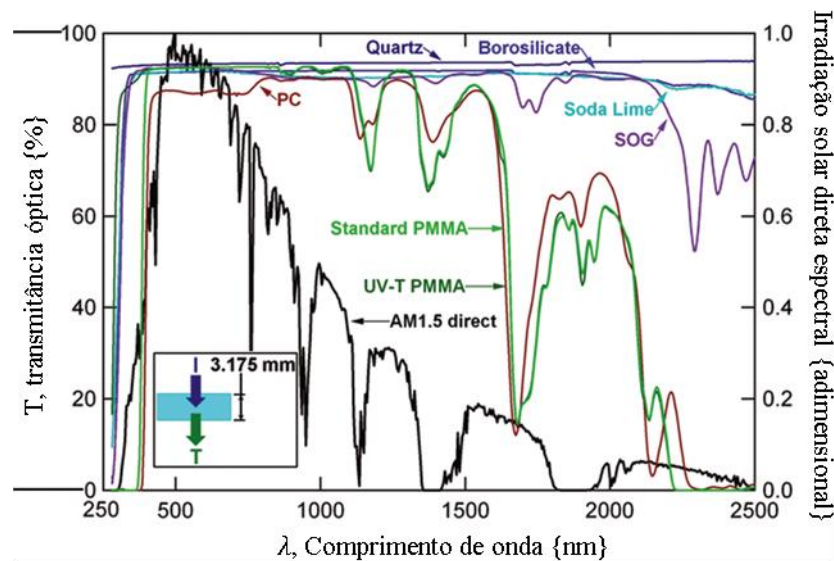
2.5.2.2 Tubo transparente

O tubo de vidro é colocado concentricamente ao tubo metálico e tem a função de minimizar as perdas térmicas por convecção e por condução. Dependendo da configuração escolhida, esse tubo deve contar também com uma vedação adequada, principalmente quando há vácuo entre os dois tubos, assunto comentado na próxima seção.

As duas principais características que esse tubo deve apresentar é a baixa refletividade e uma alta transmissividade. Para conseguir a alta transmissividade geralmente é utilizado um vidro específico com baixo teor de ferro, o mais comum é o borossilicato que apresenta a transmissividade de 0,92. Para aumentar mais ainda as propriedades óticas desse componente, geralmente é feito um tratamento antirreflexo, o que eleva para 96% a permeabilidade desse elemento a radiação solar.

A Figura 2.41 ilustra alguns materiais que podem ser utilizados na confecção do tubo transparente.

Figura 2.41 - Transmissividade espectral de diversos materiais com relativamente ao espectro solar.



Fonte: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/mobile/article.aspx?articleid=1157700>

acesso em 05/05/2015

2.5.2.3 Espaço anular

O espaço anular é a diferença entre o diâmetro interno do tubo transparente e o diâmetro externo do tubo metálico. Esse espaço pode ser preenchido com ar ou pode ser evacuado a fim de diminuir as perdas térmicas.

O tubo a vácuo geralmente é utilizado em grandes instalações onde a temperatura de trabalho é superior a 400°C. Nessas condições as perdas térmicas, por condução e convecção, induzidas pela presença de ar nesse espaço são bastante significativas, o que justifica todo o esforço no tocante a robustez e vedação das conexões.

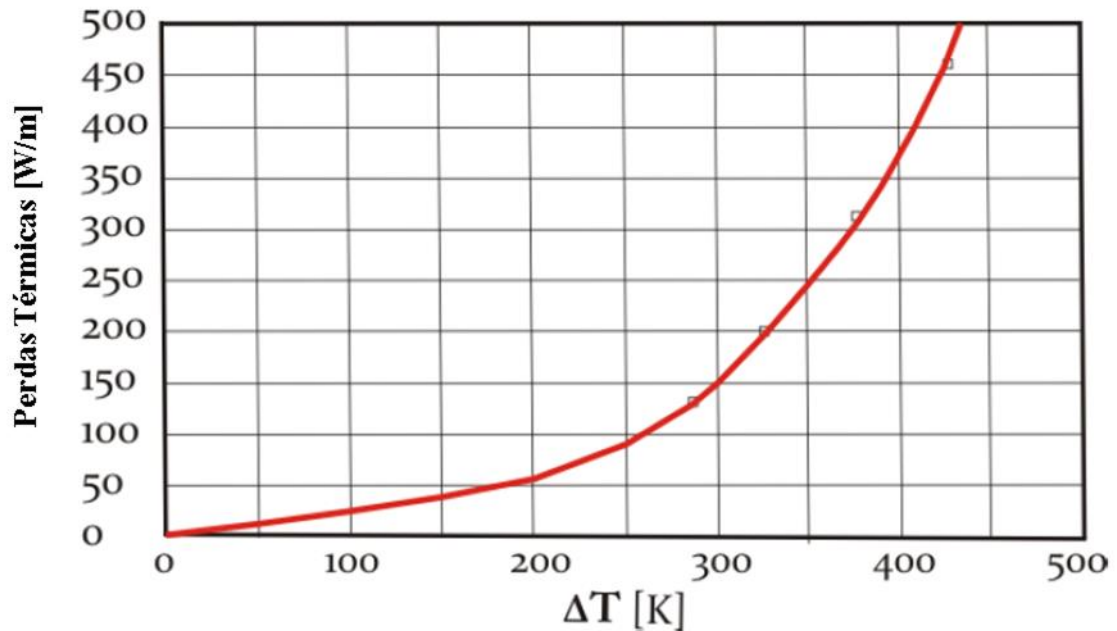
Para baixas e médias temperaturas (< 150°C), Brooks et al. (2005) demonstrou que a eficiência ganha com o vácuo não justifica todo o esforço para a fabricação do tubo e sua posterior manutenção.

Burkholder e Kutscher (2008) provaram que as perdas térmicas são extremamente dependentes da diferença de temperatura entre o tubo metálico e o ambiente. Em seus experimentos com o absorvedor Solel UVAC3 foi capaz de determinar a equação:

$$Q_{\text{perdas térmicas}} = 0,26\Delta T + 1,0510^{-8}\Delta T^4 \quad 2.13$$

As perdas térmicas são mostradas na Figura 2.42.

Figura 2.42 - Perdas térmicas pela diferença de temperatura entre tubo metálico e ambiente



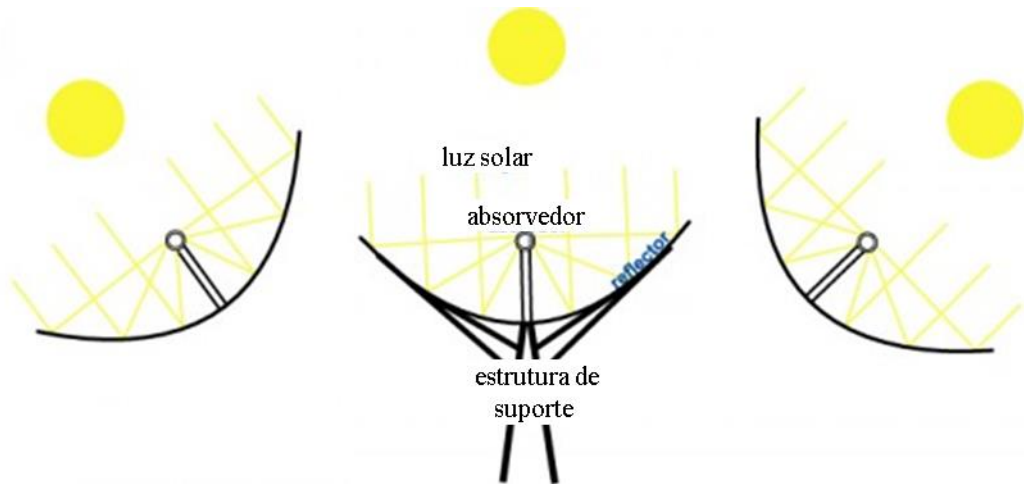
Fonte: Burkholder e Kutscher (2008)

2.5.3 Sistema de rastreamento solar

Embora apresente uma performance térmica melhor do que os coletores planos, os coletores concentradores têm extrema dependência do posicionamento com relação ao Sol. Esses coletores sempre devem “apontar para o Sol”, de maneira que o seu foco luminoso convirja para o foco geométrico do coletor. Um sistema de rastreamento de um grau de liberdade é mostrado na Figura 2.43.

O rastreamento solar pode ser em 1 ou 2 graus de liberdade como mostrado pela Figura 2.44. Como pretende-se utilizar um coletor cilíndrico parabólico, essa dissertação só abordará o rastreamento com 1 grau de liberdade, uma vez que o sistema de aquecimento solar é formado por grandes linhas de aquecimento o que torna praticamente impossível o rastreamento em dois eixos.

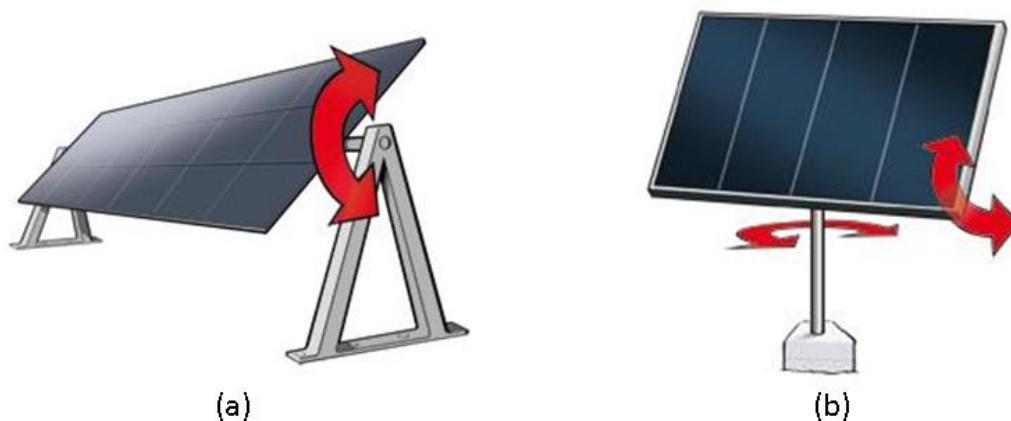
Figura 2.43 - Rastreamento solar com 1 grau de liberdade.



Fonte: <http://lamoana.hubpages.com/hub/Parabolic-trough-systems-and-their-components>,

acesso em 16/07/2015

Figura 2.44 - Rastreamento solar em 1 (a) e 2 (b) graus de liberdade.

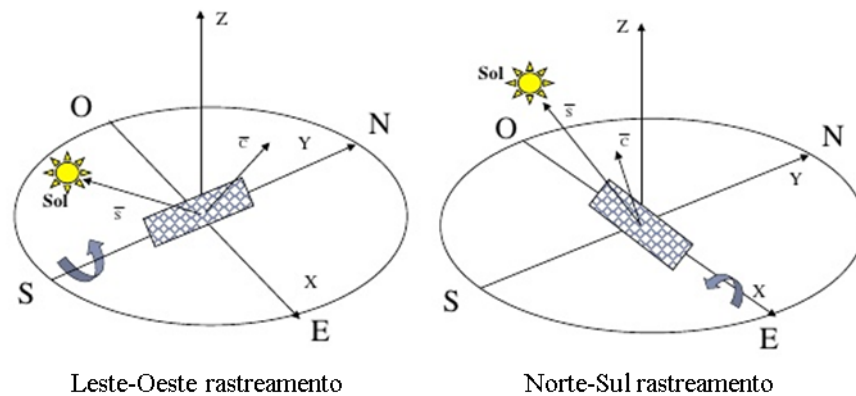


Fonte: <http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/> acesso em 01/08/2015

Um sistema de rastreamento solar deve ser capaz de seguir o Sol com uma acurácia mínima estabelecida, deve ser capaz de voltar a sua atividade após uma perturbação (condição nublada) e deve ser capaz voltar a sua condição inicial no final do dia e iniciar a sua atividade já nas primeiras horas de sol (Kalougirou, 2009).

Quando se opta por um sistema de um grau de liberdade, opta-se por um alinhamento específico e depois procura-se seguir o Sol corrigindo o posicionamento nesse eixo. Como mostra a Figura 2.45, as duas direções preferencias para o posicionamento é paralelo ao eixo Norte-Sul e ao eixo Leste-Oeste.

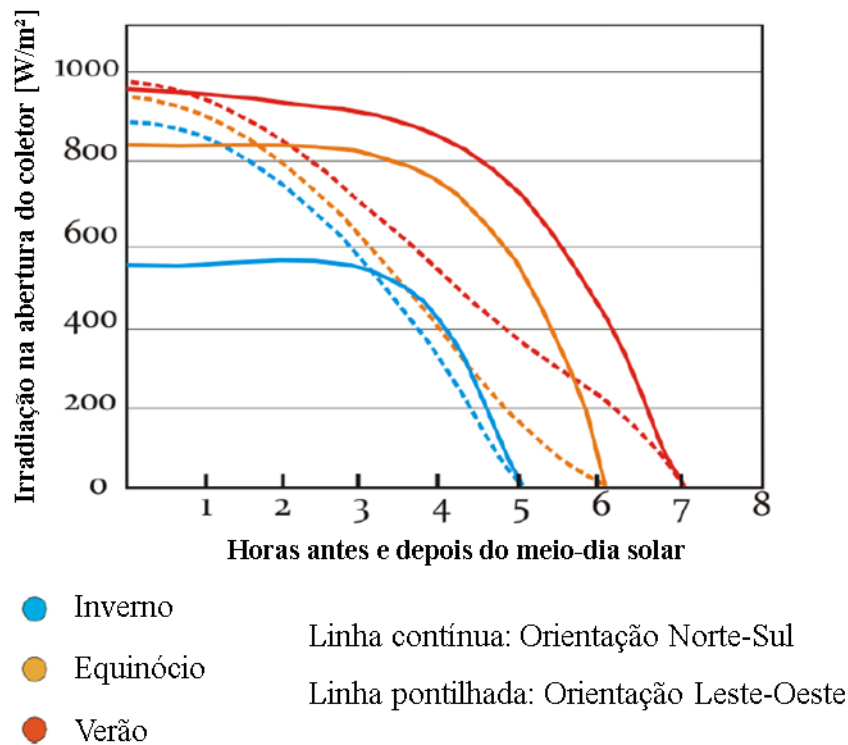
Figura 2.45 - Direções mais usuais para o posicionamento do coletor cilíndrico parabólico.



Fonte: <http://pt.slideshare.net/mchhabra27/parabolic-trough> acesso em 12/05/2015

Embora existam as duas opções supracitadas, a mundialmente utilizada é o posicionamento paralelo ao eixo Norte-Sul e rastreamento do Sol na direção Leste-Oeste. Quanto ao outro posicionamento, o mesmo só foi executado a fim de estudos. Vê-se na Figura 2.46 que a quantidade de energia coletada durante um ano é maior quando se utiliza o posicionamento paralelo a direção Norte-Sul.

Figura 2.46 - Irradiação por área durante as horas do dia em diferentes estações e posicionamentos.



Fonte: Günther, Joemann e Csambor (2011)

2.5.4 Estrutura do coletor

No coletor cilíndrico parabólico, a estrutura tem a função de manter todos os demais sistemas acoplados, além de permitir elevadas deformações, uma vez que essas diminuiriam significativamente a eficiência desse coletor.

Por se tratar de um sistema complexo e com muitos acoplamentos, não é possível realizar o seu dimensionamento a partir de equações convencionais de mecânica dos sólidos.

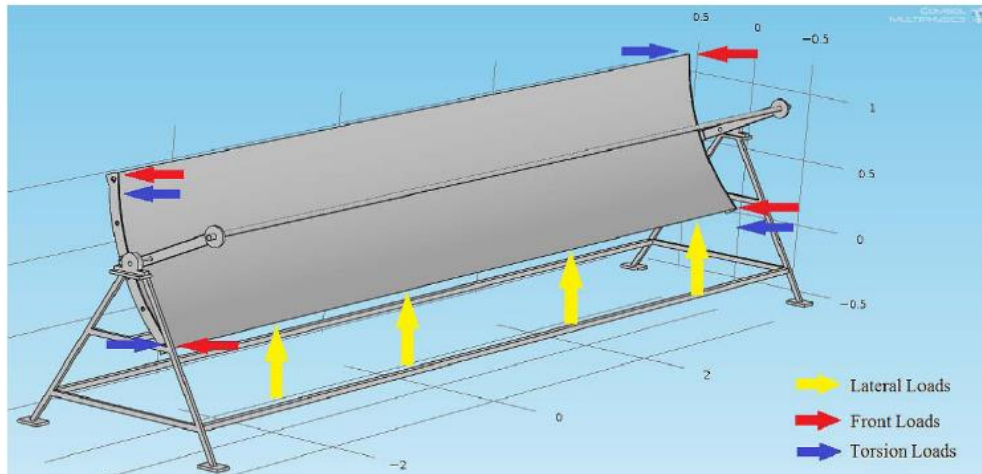
Uma abordagem que permite resultados confiáveis é a abordada por Venegas-Reyes (2012), onde o autor, a partir de uma representação em CAD do coletor cilíndrico parabólico, utiliza o método dos elementos finitos para realizar as simulações de diversos tipos de carregamentos estáticos. Para realizar essas simulações ele utilizou o Software ALGOR.

A Figura 2.47 mostra os esforços simulados na estrutura. Sabendo que os principais esforços que atuam na estrutura é devido a carga de vento, o autor optou por submeter a estrutura a três esforços principais:

- Esforço de flexão;

- Esforço de torção;
- Esforço de “Arrancamento”

Figura 2.47- Carregamentos simulados através do Método de Elementos Finitos (FEA).



Fonte: Venegas-Reyes (2012)

A partir dessa metodologia de simulações foi possível o correto dimensionamento da estrutura.

Uma vez definido todos esses novos conceitos, passaremos agora ao capítulo seguinte que expõe a metodologia utilizada nessa dissertação.

CAPITULO 3

3 METODOLOGIA

3.1 Metodologia de projeto para o desenvolvimento do coletor solar cilíndrico parabólico

O projeto de um dispositivo é um processo especializado na resolução de problemas. A solução desses é atingida quando forem satisfeitas o maior número de seus requisitos e especificações.

Para que se atingir essas condições é precisamos adotar um sequência ordenada de ações, que utiliza o mesmo princípio adotado por diversos comandantes, como Júlio Cezar e Napoleão Bonaparte, que é o princípio de “*Dividir para Conquistar*”. A partir desse raciocínio, dividiu-se o projeto em 5 partes, onde cada uma tem os seus objetivos gerais e específicos, de maneira que ao executar-se as 5 partes adequadamente ter-se-á executado todo o projeto.

Na Figura 3.1 está esquematizado o fluxograma da metodologia de projeto com suas fases principais.

- *Definição do Problema (Projeto Informacional)*: é a interpretação e a limitação dos requisitos disponíveis de forma clara e objetiva. Para tanto, reuniram-se todas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto do dispositivo a ser desenvolvido.

As fontes de informação foram: levantamento bibliográfico em revistas e livros especializados; levantamento de equipamentos já existentes focando os aspectos funcionais e de projeto;

- *Projeto Conceitual*: busca-se apresentar na forma de croquis, diagramas, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem à demanda de projeto;

- *Projeto Preliminar*: busca-se estabelecer materiais e espessuras que resistam aos esforços solicitados em conformidade;

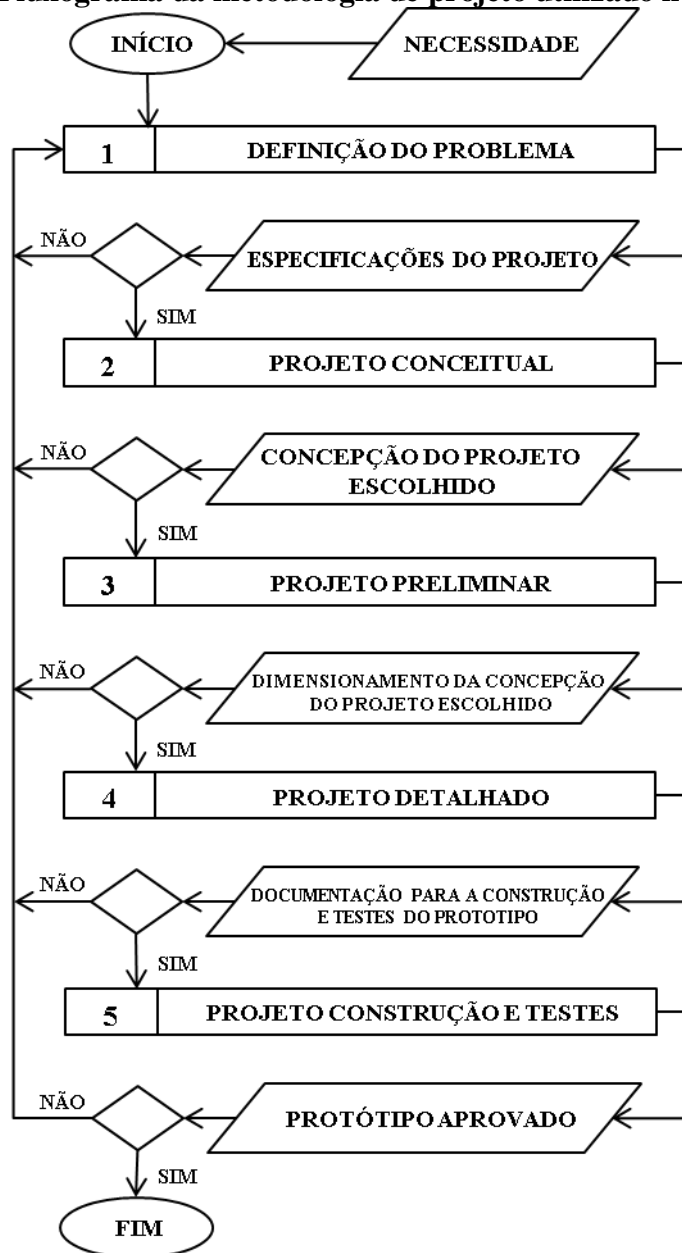
- *Projeto Detalhado*: com relação aos processos de fabricação e as normas vigentes no país, quanto à segurança operacional e a confiabilidade do produto, detalhando a documentação para a construção do protótipo;

- *Construção do Protótipo*: faz-se uso dos recursos disponíveis em termos de fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores;

- *Teste de Validação*: para verificação ao atendimento às especificações de projeto e, conseqüentemente, a demanda inicial.

No presente trabalho foram desenvolvidas todas as etapas do projeto.

Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia de projeto utilizado nesse trabalho.



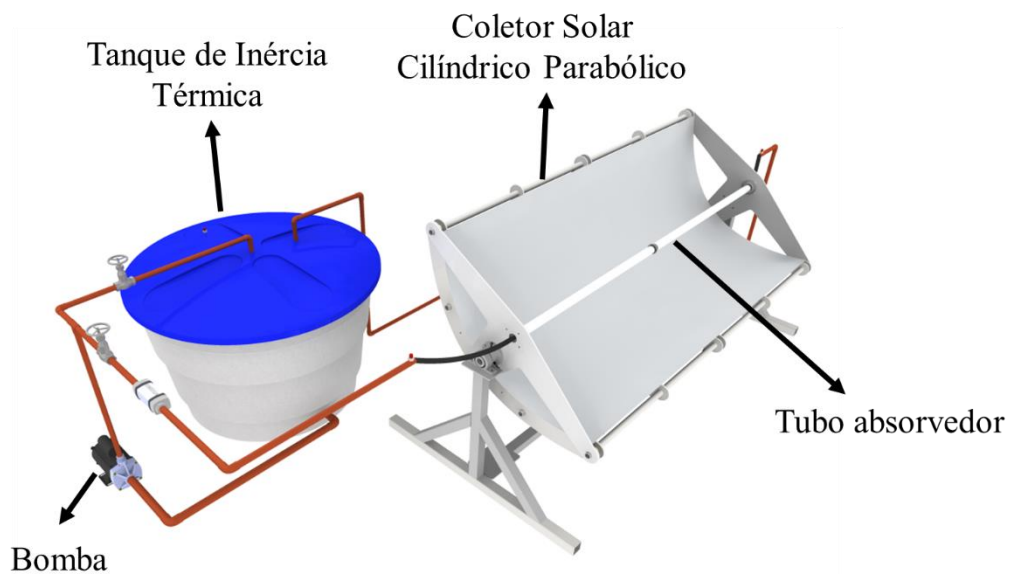
3.2 Metodologia para o teste de campo do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico

Os testes de campo do coletor serão realizados a partir do aparato mostrado na Figura 3.2. O sistema deve apresentar um sistema de controle capaz de iniciar o teste logo nas primeiras horas de Sol.

Inicialmente o sistema deve sair da sua posição de repouso e se posicionar automaticamente para o nascente independente da época do ano, assim independente da real posição do Sol. Uma vez estando na posição adequada, o sistema de bombeamento de fluido é acionado, havendo o início do processo de aquecimento. A partir daí o sistema seguirá o Sol durante todo o dia, não permitindo que o foco luminoso divirja do foco geométrico e assim cedendo a maior quantidade de calor para o fluido de trabalho, que vai ter a sua temperatura monitorada e armazenada no sistema de aquisição de dados que será acoplado ao aparato.

Os diversos testes que serão realizados consistirão na variação da vazão (variável controlável) e da variação das condições climáticas (variável não-controlável). Ambas as variáveis serão aquisitadas e carregadas no programa computacional para aumentar a confiabilidade das simulações.

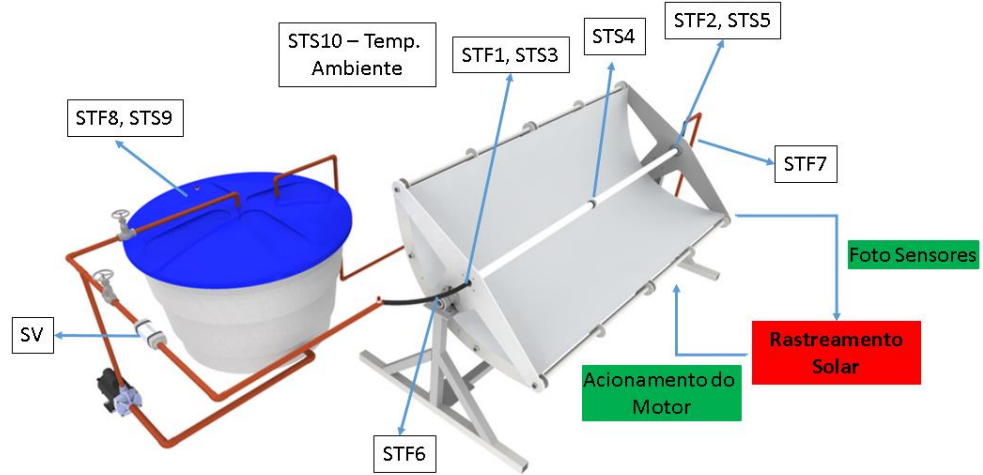
Figura 3.2 - Aparato para teste do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria Própria

Para a realização dos testes de campo serão realizados a instrumentação e automatização do Coletor Solar, como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Instrumentação do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria Própria

Os sensores são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Sensores utilizados no coletor solar cilíndrico parabólico.

Sensor de:	Posição	Nomenclatura do sensor	Nomenclatura da leitura
Temperatura	Em contato com o fluido na entrada do tubo absorvedor	STF1	T1
Temperatura	Em contato com o fluido na saída do tubo absorvedor	STF2	T2
Temperatura	Na superfície de entrada do tubo absorvedor	STS3	T3
Temperatura	Na superfície na região do meio do tubo absorvedor	STS4	T4
Temperatura	Na superfície de saída do tubo absorvedor	STS5	T5
Temperatura	Em contato com o fluido antes da entrada do absorvedor	STF6	T6
Temperatura	Em contato com o fluido depois da saída do absorvedor	STF7	T7
Temperatura	Interno ao reservatório	STF8	T8
Temperatura	Externo ao reservatório	STS9	T9
Temperatura	Exposto ao ambiente	STS10 – Temp. Ambiente	T _{amb}
Vazão	Trecho reto da tubulação	SV	V
Radiação	Exposto ao ambiente	SR	DNI

Fonte: Autoria Própria

Legenda:

- STS - Sistema de medição de Temperatura Seca (Sensor não está em contato com o fluido de trabalho);
- STF - Sistema de medição de Temperatura do Fluido (Sensor está em contato com o fluido de trabalho).

3.2.1 Detalhamento dos sensores

Os sensores ST1 e ST2 são os responsáveis pela obtenção do comportamento da temperatura do fluido ao longo do tubo absorvedor, por isso são posicionados em contato com o fluido na entrada e saída do fluido, respectivamente.

Os sensores ST3 a ST5 são responsáveis pela obtenção do comportamento da temperatura da superfície do tubo metálico do absorvedor, resultando assim em sua temperatura média. Eles são alocados em contato com a superfície do tubo metálico nas posições de entrada, meio e saída, respectivamente.

Os sensores ST6 e ST7 são responsáveis para a captação das temperaturas dos fluidos antes da passagem e após a saída do tubo absorvedor, respectivamente.

Os sensores ST8 e ST9 são responsáveis pelas medidas de temperaturas relativas ao reservatório. O ST8 proporciona a temperatura do fluido interno ao reservatório, para tanto fica posicionado no interior do mesmo em contato com o fluido. Já o ST9 é externa ao reservatório e isolamento, de modo a fornecer uma leitura da temperatura na vizinhança do reservatório. A combinação das leituras destes sensores fornece uma medida da perda térmica do fluido no interior do tanque para o ambiente.

O sensor ST10 é responsável pela temperatura ambiente e deve ser posicionado de modo exposto ao ambiente de modo a sua leitura não tem influência do sistema.

O SV é responsável pela leitura da vazão do sistema. A literatura recomenda sua instalação em um trecho reto da tubulação, de modo a evitar efeitos relativos à perturbações do escoamento (como recirculação e perdas de carga localizadas, causadas por mudanças de direção de escoamento por exemplo).

O SR é o conjunto responsável pela captação da radiação solar direta. Deve ser posicionado de modo exposto ao ambiente.

A partir da instrumentação apresentadas na Figura 3.3 serão realizados os testes e o levantamento das curvas, para posterior comparação com o obtido na simulação.

3.3 Metodologia de simulação computacional do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico.

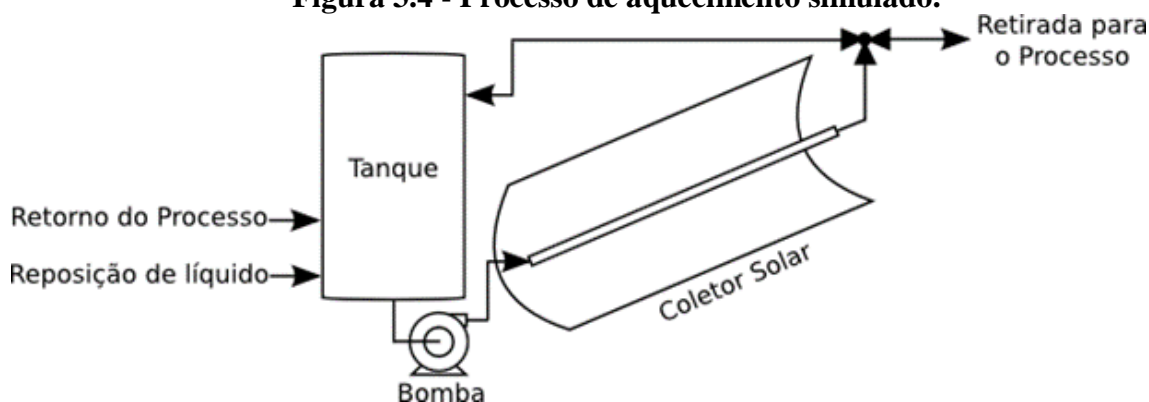
Para auxiliar tanto na fase de projeto, quanto na fase de testes do coletor solar, foi utilizado um programa desenvolvido por Coutinho, (2013). Esse programa permite a alteração dos principais parâmetros do coletor, bem como as condições de insolação as quais ele está submetido, permitindo assim, estimar a sua performance.

O programa computacional mencionado foi desenvolvido em FORTRAN 90 e emprega o método de Runge Kutta de 4ª ordem na resolução do sistema de equações diferenciais. Esse utiliza um passo de tempo de 0,001s e permite a simulação por aproximadamente 11 horas reais.

O programa simula a condição ilustrada na Figura 3.4, onde é mostrado um tanque pulmão acoplado ao sistema de aquecimento por onde circula o líquido de aquecimento. No início do dia a água está a uma temperatura ambiente, que é inferior a necessária para o processo, nas primeiras horas de Sol tem-se início o processo de aquecimento do fluido, no qual este ganha calor até atingir a temperatura ideal para o processo.

Durante esse primeiro período o fluido é bombeado em ciclo fechado entre o coletor e o tanque. Uma vez que tenha sido atingida a temperatura do processo, esse fluido será desviado para o processo, nesse ponto um novo fluido entra no sistema para ser aquecido e a partir daí o fornecimento de calor para o processo se torna contínuo.

Figura 3.4 - Processo de aquecimento simulado.

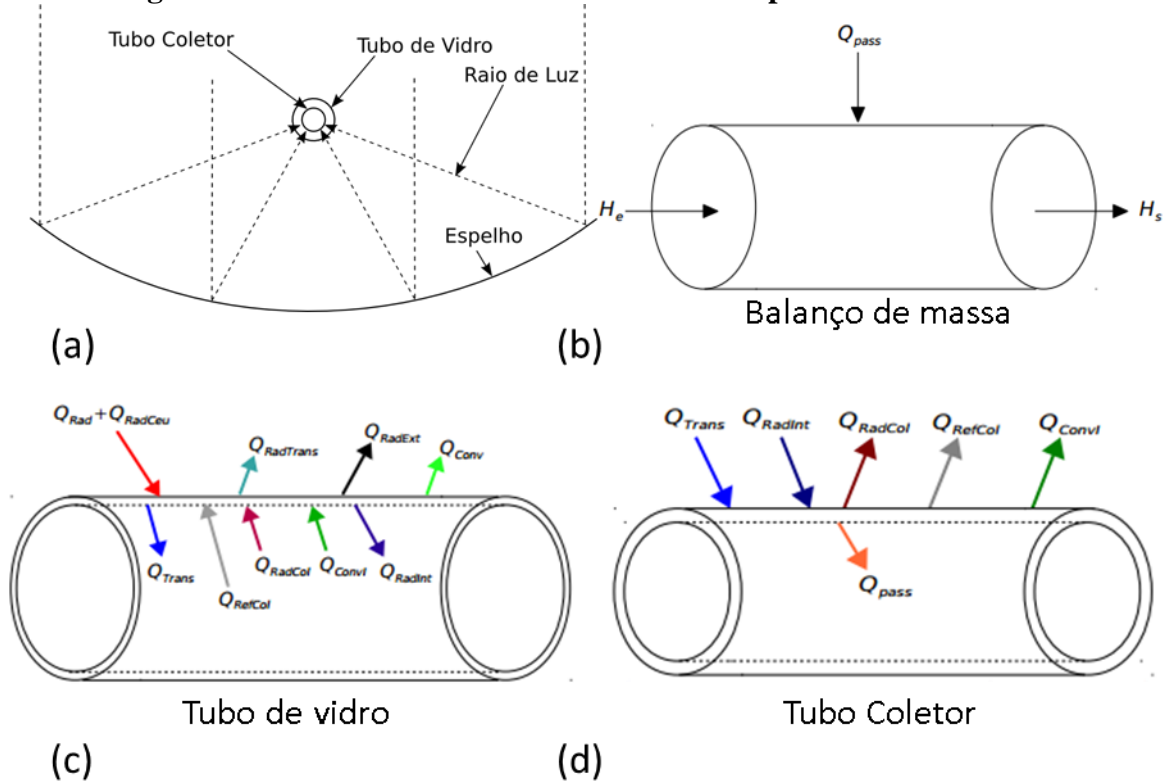


Fonte: Coutinho, (2013)

Dentro do programa computacional, a parte que interessa a essa dissertação é a simulação do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico. A partir da Figura 3.5, que mostra o modelo utilizado na simulação realizada por Coutinho (2013). A partir da análise desse modelo são percebidas algumas considerações simplificadoras feitas pelo autor:

- Considera apenas dois subsistemas do coletor: Superfície refletora e tubo absorvedor;
- Estrutura e sistemas de rastreamento são considerados perfeitos;
- Fator de interceptação é igual a 1;
- Não considera as perdas de final de linha.

Figura 3.5 - Detalhes do coletor solar cilíndrico parabólico simulado.



Fonte: Coutinho, (2013)

A partir do detalhamento apresentado nas Figura 3.5 (b), (c) e (d) são geradas as equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. Esse modelo gera um sistema de equações diferenciais que foram resolvidas utilizando-se o método de Runge-Kutta.

$$Q_{pass} - \dot{m}_{Liq} C_{PLiq} (T_{Liqs} - T_{Liqe}) = m_{Liq} C_{PLiq} \frac{dT_{Liq}}{dt} \quad 3.1$$

$$-Q_{RadExt} - Q_{RadInt} - Q_{Conv} = m_{vidro} C_{Pvidro} \frac{dT_{vidro}}{dt} \quad 3.2$$

$$\alpha_{Col} (Q_{Trans} + Q_{RadInt}) - Q_{RadCol} - Q_{Conv} - Q_{pass} = m_{Col} C_{PCol} \frac{dT_{Col}}{dt} \quad 3.3$$

A utilização do programa permite a simulação e comparação com os testes experimentais feitos no Coletor Solar. Essa comparação é possível devido aos recursos do software que permite, a partir dos dados de radiação solar e condições do vento, simular as condições as quais o coletor foi submetido, permitindo a comparação do resultado simulado com o resultado medido experimentalmente.

Além dos dados apresentados de radiação e velocidade de vento, é possível modificar no programa todos os parâmetros apresentados na Tabela 3.2. Os dados apresentados na referida tabela são os do protótipo do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico

Tabela 3.2 - Principais dados para a simulação computacional.

Comprimento do coletor solar	2 m
Largura do coletor solar	1 m
Diâmetro do tubo de vidro	0,038 m
Diâmetro do tubo coletor	0,0172 m
Refletividade do espelho	0,65
Absortividade do tubo de vidro	0,05
Refletividade do tubo de vidro	0,05
Emissividade do tubo de vidro	0,05
Transmissividade do tubo de vidro	0,85
Absortividade do tubo coletor	0,98
Emissividade do tubo coletor	0,98
Vazão para o processo	0
Vazão de água	10,7 l/s
Volume do tanque	50 l
Temperatura inicial do tanque	23,1
Temperatura inicial da água	23,1
Temperatura inicial do tubo de vidro	23,1
Temperatura inicial do tubo coletor	23,1
Vazão do líquido de reposição	0

Fonte: Autoria própria

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Projeto informacional de um coletor solar cilíndrico parabólico

O projeto informacional é a primeira fase do projeto, também chamado de definição de tarefas ou planejamento do produto. Para realizar essa etapa, é preciso identificar e analisar as necessidades do consumidor, descrever a ideia do produto e determinar os requisitos e as especificações do projeto.

Para que seja possível a elaboração da lista de Requisitos e Especificações é necessário o levantamento e estudo da maior quantidade de material referente ao projeto que seja possível no tempo estabelecido para essa atividade. As principais fontes de informação para essa fase do projeto são:

- Acadêmico: Teses, dissertações, livros e artigos
- Tecnológica: Patentes de Equipamentos
- Mercado: Vídeos e catálogos
- Normas: Ensaio
- Consulta com especialistas.

Embora ainda não exista nenhuma instalação de grande porte que utilize coletores solares de média temperatura, no Brasil, já foram desenvolvidos trabalhos por pesquisadores brasileiros, os quais tem por objetivo o desenvolvimento dessa tecnologia. Analisar-se-á alguns desses trabalhos, bem como trabalhos internacionais e patentes tornam público algumas configurações de coletores

4.1.1 - Projeto, Construção e Levantamento de Desempenho de um Concentrador Solar Cilindro Parabólico com Mecanismo Automático de Rastreamento Solar

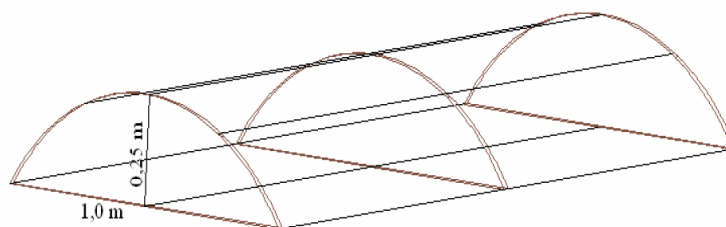
O título mencionado acima trata-se de um trabalho de mestrado desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, tem por objetivo o dimensionamento, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilindro-parabólico para o aquecimento e/ou vaporização da água para aplicações residenciais e Industriais.

Os dois principais motivadores de tal projeto foram: em primeiro lugar, o desenvolvimento de aquecedor de fluidos movido a energia solar, de baixo custo, a fim de que essa tecnologia passa ser transferida para comunidades rurais de baixa renda. O segundo motivo referiu-se ao fato da universidade está localizado numa região com uma insolação da ordem de 3000 horas/ano.

A fim de conseguir esse baixo custo, o protótipo foi feito com materiais alternativos, inclusive utilizando sucata de mobília escolar.

Iniciando a análise pela superfície refletora. O perfil utilizado foi um perfil parabólico, obtido em Duffie (2006), que segue a equação $y^2 = 4fx$, onde f é a distância focal do coletor. A partir dessa equação, foi confeccionado um molde em fibra de vidro, como mostrado na Figura 4.1 que posteriormente recebeu diversas tiras de vidro ao longo do seu contorno a fim de que fosse obtida a superfície refletora.

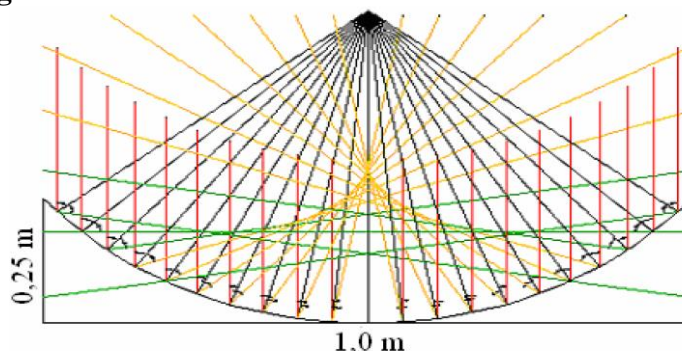
Figura 4.1 - Desenho do Molde do concentrador Cilindro-Parabólico.



Fonte: Souza Filho (2008)

Inicialmente foi imaginado um coletor com a seção transversal de 1 metro, contudo após a análise da qualidade da superfície refletora, mostrada na Figura 4.2, observou-se que a utilização dessa abertura ocasionou um grande espalhamento, assim diminuindo o fator de interceptação teórico da superfície.

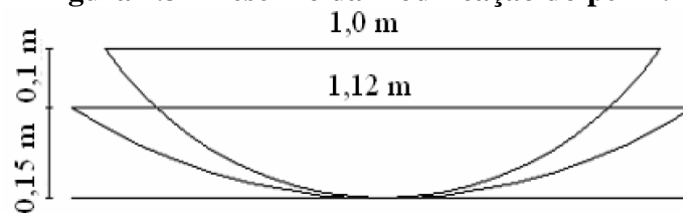
Figura 4.2 - Análise do direcionamento dos raios solares.



Fonte: Souza Filho (2008)

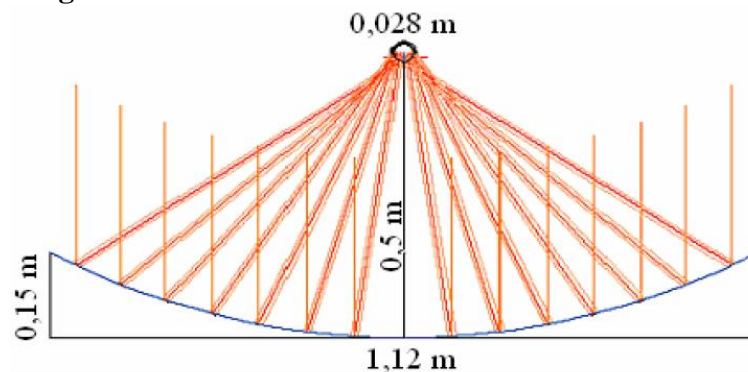
A solução encontrada foi o aumento da abertura do coletor, como mostrado na Figura 4.3. A partir dessa mudança conseguiu-se uma significativa melhora no fator de interceptação, como mostrado na Figura 4.4. Atribui-se essa significativa melhora no fator de interceptação, devido à diminuição na curvatura da parábola, como mostra a Figura 4.3. Assim, como se deseja aproximar essa curva por pequenos segmentos de retas (tiras de espelhos), consegue-se uma melhor aproximação dessa geometria quanto menor for a variação dessa curvatura, de maneira a se ter a uma geometria perfeita, caso o mesmo fosse inteiramente reto.

Figura 4.3 - Desenho da modificação do perfil.



Fonte: Souza Filho (2008)

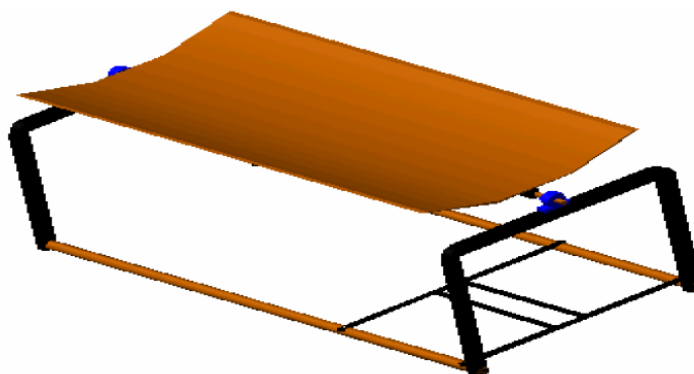
Figura 4.4 - Nova análise direcional dos raios solares



Fonte: Souza Filho (2008)

Após essa correção, foi feito um novo molde, onde foram colocadas diversas tiras de vidro, a fim de se obter a superfície refletora. Esse sistema encontra-se representado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Desenho da estrutura do coletor.



Fonte: Souza Filho (2008)

Relata-se agora ao projeto do tubo coletor. Como tubo coletor o autor utilizou um tubo de cobre de 2,2 metros de comprimento por 28 mm de diâmetro pintado de preto fosco e sem cobertura de vidro, como mostrado na Figura 4.6. Observamos também a fixação do tubo que é feito a partir de dois segmentos de tubos de ferro galvanizado. Como fluido de trabalho o pesquisador utilizou água pura.

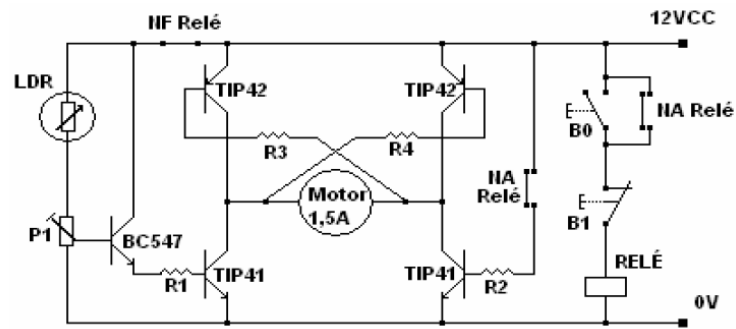
Figura 4.6 - Tubo absorvedor do concentrador proposto.



Fonte: Souza Filho (2008)

Por fim, o sistema de rastreamento empregado é composto por um motor CC (Polymotor) de 24V, acoplado em uma bateria de moto de 12V. Também foi utilizada sucata de moto (corrente, coroa e pinhão), acoplado numa caixa de redução e 70:1. A fim de controlar esse motor foi fabricada uma placa de circuito impresso mostrado na Figura 4.7.

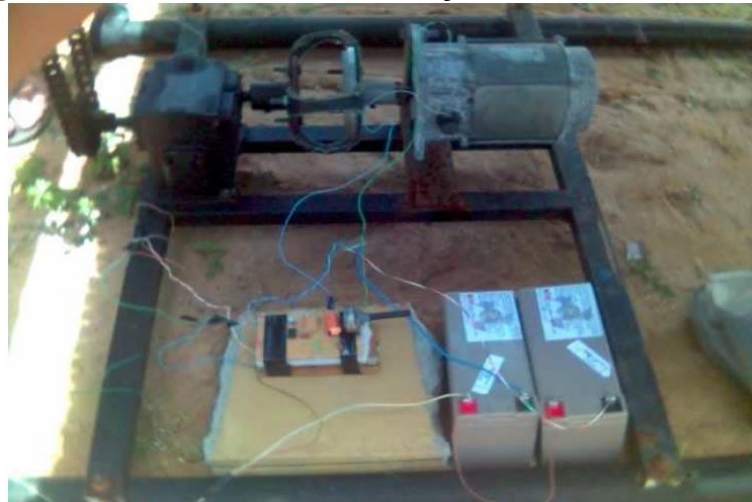
Figura 4.7- Diagrama elétrico do controlador.



Fonte: Souza Filho (2008)

O sistema de rastreamento montado é mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Sistema de automatização do concentrador solar.



Fonte: Souza Filho (2008)

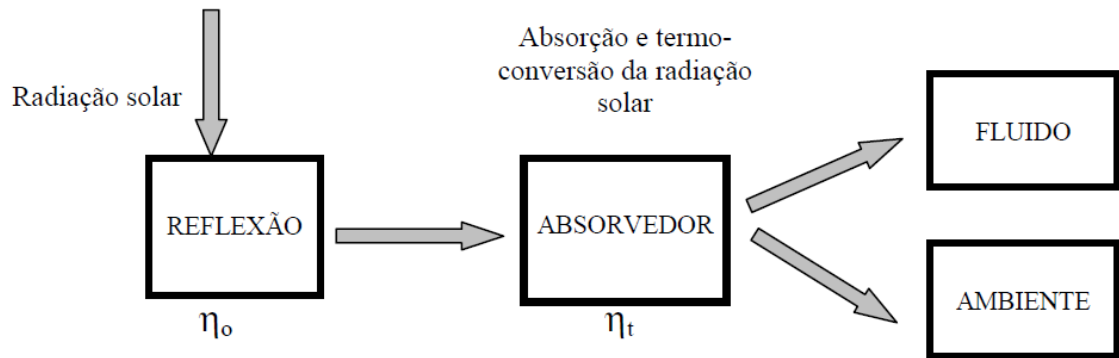
Contudo a principal contribuição desse trabalho foi a sua abordagem de análise do coletor, apresentada na Figura 4.9. A partir dessa figura o pesquisador faz uma avaliação integral, focando principalmente na superfície refletora (eficiência ótica) e no tubo absorvedor (eficiência térmica), levando o mesmo a calcular a eficiência do coletor através da Equação:

$$\eta_u = \eta_o * \eta_t \quad 4.1$$

Onde,

- η_u - Eficiência Global do Coletor;
- η_o - Eficiência Ótica;
- η_t - Eficiência Térmica;

Figura 4.9 - Esquema de Termoconversão de energia solar.



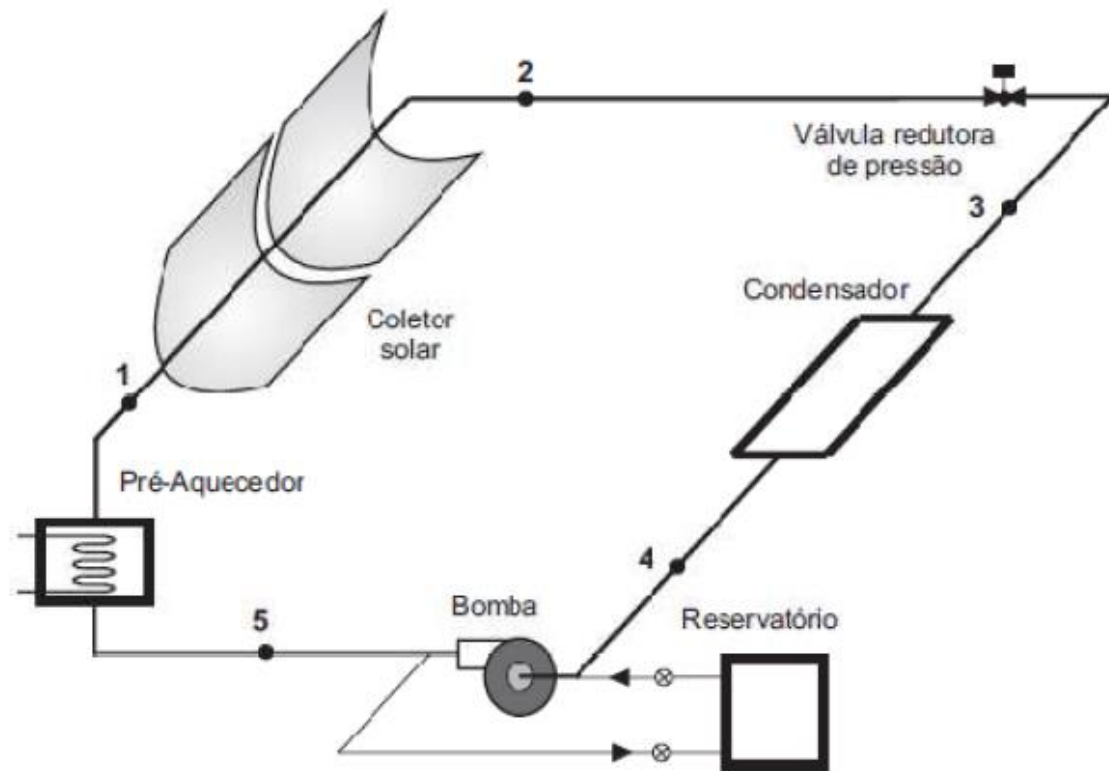
Fonte: Souza Filho (2008)

4.1.2 - Análise Experimental de um Sistema Solar com Concentrador Cilindro Parabólico

O referido trabalho foi um mestrado desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina e teve por objetivo o desenvolvimento de uma bancada e testes de um coletor concentrador cilindro parabólico. A seguir na Figura 4.10, vê-se um esquema do aparato utilizado para a avaliação do coletor desenvolvido.

Embora se tenha mostrado todo o aparato, nesse momento o interesse será apenas na construção do coletor cilíndrico parabólico utilizado.

Figura 4.10- Ilustração do aparato experimental utilizado



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Para o projeto do coletor, Pigozzo Filho (2013), divide o seu coletor em quatro partes (aqui definidas como subsistemas):

- Estrutura de sustentação;
- Superfície refletora;
- Tubo absorvedor;
- Sistema de rastreamento.

4.1.2.1 Estrutura de sustentação

Essa estrutura tem por objetivo suportar todos os demais subsistemas, possibilitando o correto funcionamento do coletor. A estrutura deve possuir resistência mecânica de tal forma a suportar todas as cargas, sejam elas mecânicas ou térmicas, sem comprometer as suas qualidades óticas. A estrutura de sustentação é composta por costelas parabólicas, unidas através de tubos e suportadas por uma estrutura fabricada em perfis de aço.

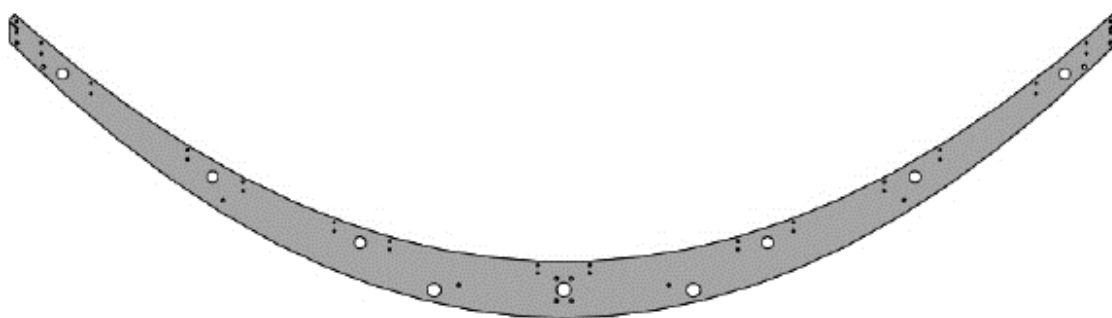
A costela apresentada na Figura 4.11 foi fabricada em uma máquina de corte a laser com Comando Numérico Computacional (CNC), com o objetivo de garantir a precisão do seu

formato parabólico. Esse elemento, conhecida como “espinha de peixe”, foi fabricado com o comprimento de 3 metros segundo a equação:

$$y = 0,3x^2 \quad 4.2$$

A escolha da largura se deu por dois motivos: em primeiro lugar, por causa da limitação da máquina que realizou o corte a laser. Em segundo lugar, porque caso fosse fabricado um coletor com a abertura maior que essa, seria necessário um estudo mais aprofundado do ponto de vista estrutural.

Figura 4.11 – Costela do coletor parabólico.



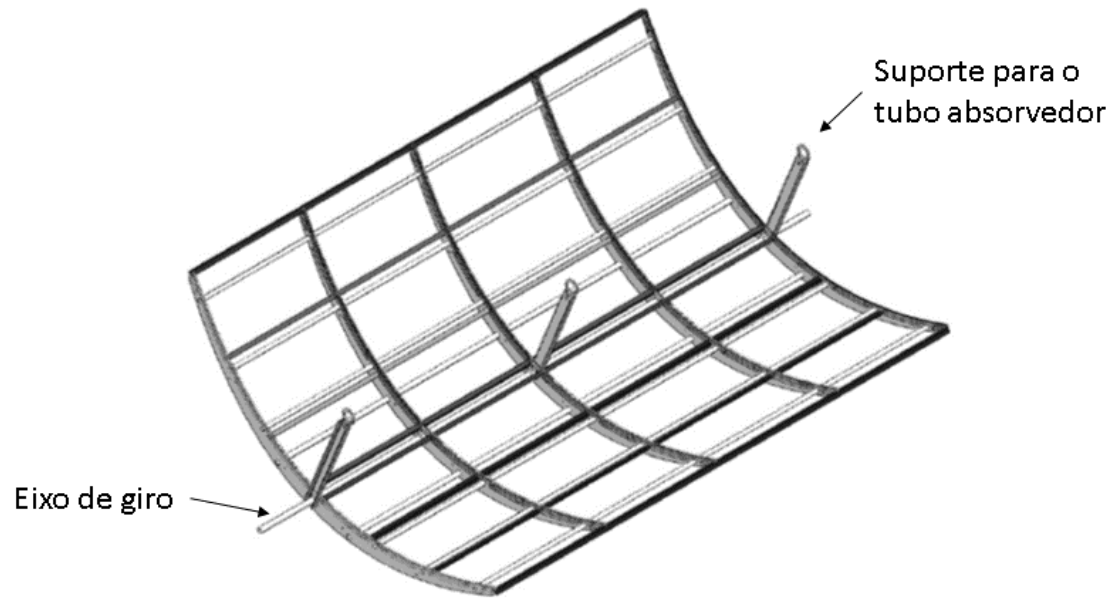
Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Foram fabricadas cinco (05) costelas e unidas com o distanciamento de 1 metro uma da outra, obtendo assim uma estrutura de 4 metros de comprimento. Essas costelas foram unidas por tubos de união longitudinal, presos por flanges. A fixação da superfície refletiva foi feita através de cantoneiras fixadas nas costelas, dessa maneira fazendo com que a chapa de aço inox assumisse a mesma forma da costela.

Por fim tem-se uma estrutura de sustentação dos painéis com 12 m² de área de abertura e com um fator de concentração de aproximadamente 14. A estrutura de sustentação é mostrada na Figura 4.12. Vê-se ainda nessa figura, os três suportes para o tubo absorvedor.

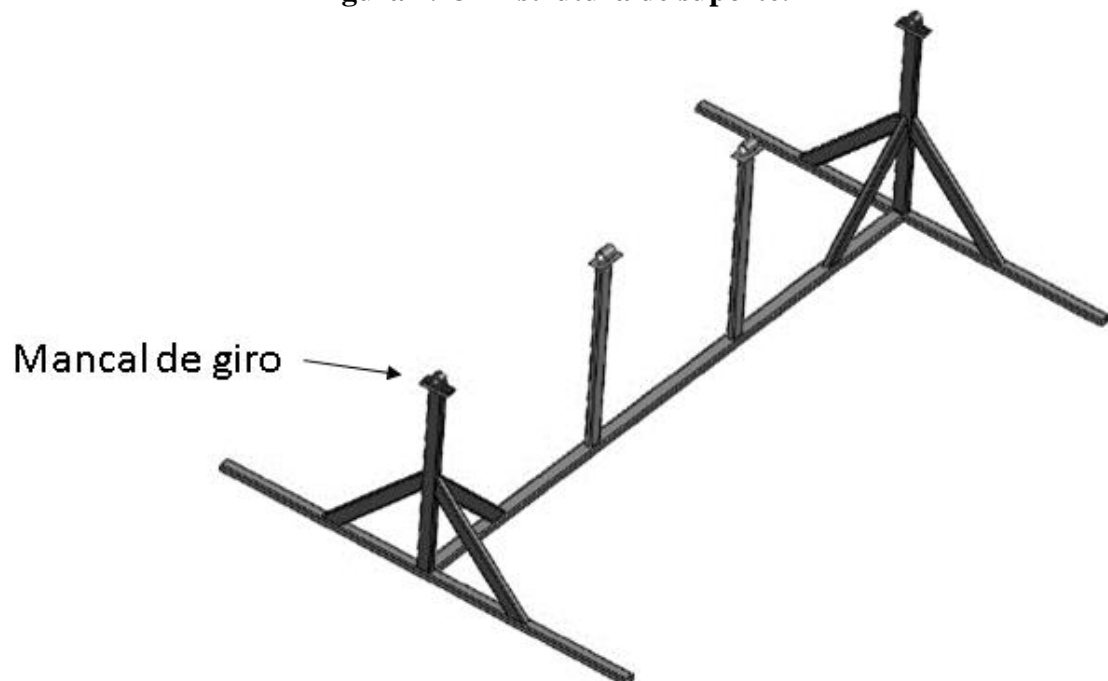
Como se trata de coletor concentrador, esse tem que acompanhar o Sol durante todo o seu trajeto. Assim, foi projetada uma base que suporta a estrutura mostrada na Figura 4.12 de tal forma que permita que ela rastreie o Sol, basculando em torno do seu eixo de giro. A estrutura foi feita em perfis de aço e é mostrada na Figura 4.13.

Figura 4.12 Estrutura do coletor cilindro parabólico.



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Figura 4.13 - Estrutura de suporte.



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

4.1.2.2 Superfície refletora

A fim de refletir os raios solares para o tubo absorvedor, foram utilizadas folhas de aço inox recobertas com um filme refletivo. Essas folhas foram assentadas sobre as costelas do coletor e fixadas a ele por meio de cantoneiras que haviam sido previamente fixadas as costelas.

A superfície é composta por 14 folhas de aço inox, recoberta por uma película refletora da empresa IDCOOK. Essa película é formada por uma camada de alumínio puro (material que confere uma alta refletividade), recoberto por camadas de material polimérico e é aplicada a superfície um pouco antes da sua colocação na estrutura.

Segundo dados fornecidos pelo fabricante, a película (quando aplicadas da maneira adequada) confere a superfície uma refletividade de 0.9 (90%) e uma vida útil que pode variar de 3 a 5 anos, sendo necessária uma manutenção na superfície refletora após esse período. Uma imagem do filme é mostrada na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Rolo da película refletiva.



Fonte: Site: <http://www.idcook.com/en/21-solar-reflectors>, Acesso em: 15/05/2015

4.1.2.3 Tubo absorvedor

O tubo absorvedor é responsável por absorver a radiação que é refletida pela superfície refletora e transferi-la para o fluido de troca térmica neste caso a água). O tubo utilizado nessa dissertação foi adquirido da empresa Gaia-Solar, localizada na China.

Como já foi mostrado, esse subsistema é construído de maneira a absorver uma grande quantidade de radiação e apresentar uma perda térmica muito pequena. Esse componente é formado por um tubo central de aço inox ANSI 304, com 70 mm de diâmetro e concentricamente a ele é colocado um tubo de vidro de borossilicato, com 120 mm de diâmetro. A escolha do material do tubo interno se deu pela alta resistência a corrosão apresentada pelo

aço inox, e o tubo de borossilicato foi escolhido pelo alta transmissibilidade que esse material apresenta para comprimentos de onda dentro da faixa do visível. Uma imagem de um tubo similar é mostrada na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Partes do tubo absorvedor.



Fonte: Modificado Site: <http://www.bine.info/en/publications/publikation/solarthermische-kraftwerke-2/parabolrinnen-kollektortechnik/>, Acesso: 15/05/2015

O tubo preto interno possui um tratamento superficial, que lhe confere uma alta absortividade a componente direta da radiação solar. Esse tratamento é feito por deposição de plasma, processo Sputtering, de material tipo CERMET, com composição de Al-N/Al, ele também confere a superfície uma absortividade da radiação no espectro solar de 0,93 (93%) e emissividade de 8% no espectro infravermelho. Valores válidos a 80°C.

O espaço anular é evacuado com o objetivo de reduzir as perdas por condução e convecção. Já o tubo de vidro apresenta uma transmissibilidade de aproximadamente 0,9 (90%) para a radiação solar, além disso o mesmo é opaco para a radiação infravermelho emitida pelo tubo metálico, diminuindo assim as perdas por reflexão.

Com relação à união dos tubos, a mesma geralmente é feita com uma união específica que une duas extremidades do tubo por meio de interferência mecânica. Contudo Pigozzo Filho

(2013), optou por soldar flanges de aço inox nas extremidades dos tubos, para que pudesse realizar sua fixação. A união dos tubos foi realizada como mostra a Figura 4.16.

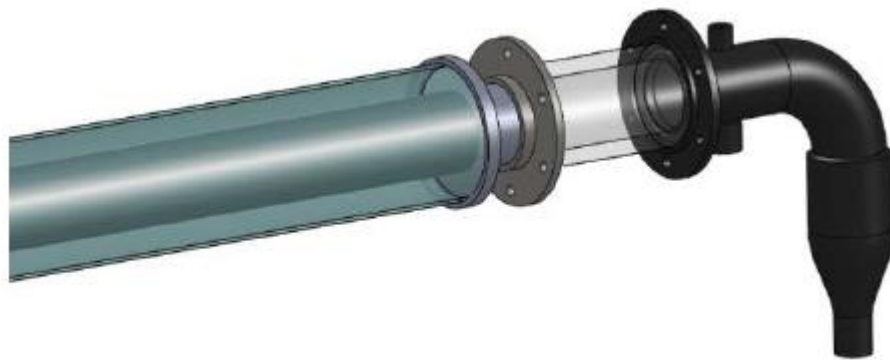
Figura 4.16 - Esquema de montagens dos tubos.



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Um outro artifício utilizado por Pigozzo Filho (2013), que embora não ajude no projeto, mas é muito importante na hora de testar o equipamento, foi a colocação de um tubo de vidro nas extremidades da união dos tubos absorvedores. Essa é de grande importância, pois permite a visualização do escoamento no interior do fluido durante os testes. Esse artifício é mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Tubo de vidro para visualização do escoamento.



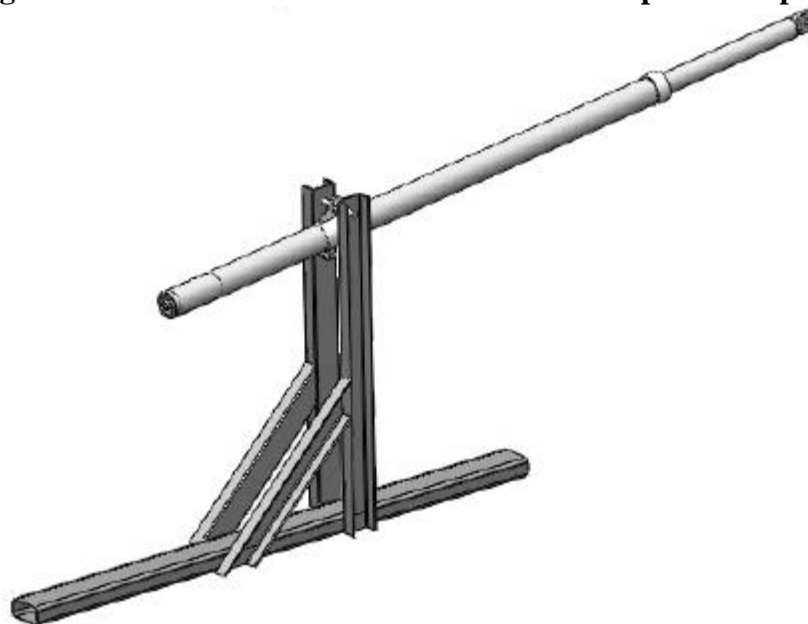
Fonte: Pigozzo Filho (2013)

4.1.2.4 Rastreamento solar

O rastreamento tem a função de corrigir o posicionamento do coletor de maneira a fazer com que a componente direta da radiação solar incida perpendicularmente ao plano de abertura do coletor.

O sistema de rastreamento adotado por Pigozzo Filho (2013), foi um atuador linear da Fusionseeker que, acoplado ao coletor gera um movimento angular corrigindo o posicionamento do coletor. O atuador e o suporte são mostrados na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Atuador linear da Fusionseeker acoplado a suporte.



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

O motor utilizado no atuador é de 24 VDC, o qual é acoplado a uma redução e possibilita esse atuador apresentar uma força de 20 kN. O atuador se conecta ao eixo da estrutura do coletor através de um braço de alavanca de 480mm.

O atuador mostrado anteriormente na Figura 4.18, foi adquirido da empresa Fusionseeker, localizada na Eslováquia. Esse atuador é controlado por dois sensores fotovoltaicos coplanares com o plano de abertura do coletor, assim se um sensor recebe mais radiação que o outro, o atuador entra em ação a fim de equilibrar essa diferença. O sistema de controle é mostrado na Figura 4.19. Este apresenta uma precisão de $0,3^\circ$ quando submetido a uma radiação direta de 1kW/m^2 .

Figura 4.19 - Controle de posicionamento solar Fusionseeker DS-50S5.



Fonte: Adaptado do site: <http://www.fusionseeker.com/1DS-50S5.htm>, acesso em: 16/05/2015

O coletor projetado e construído por Pigozzo Filho (2013) é mostrado na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Montagem do coletor cilindro parabólico.



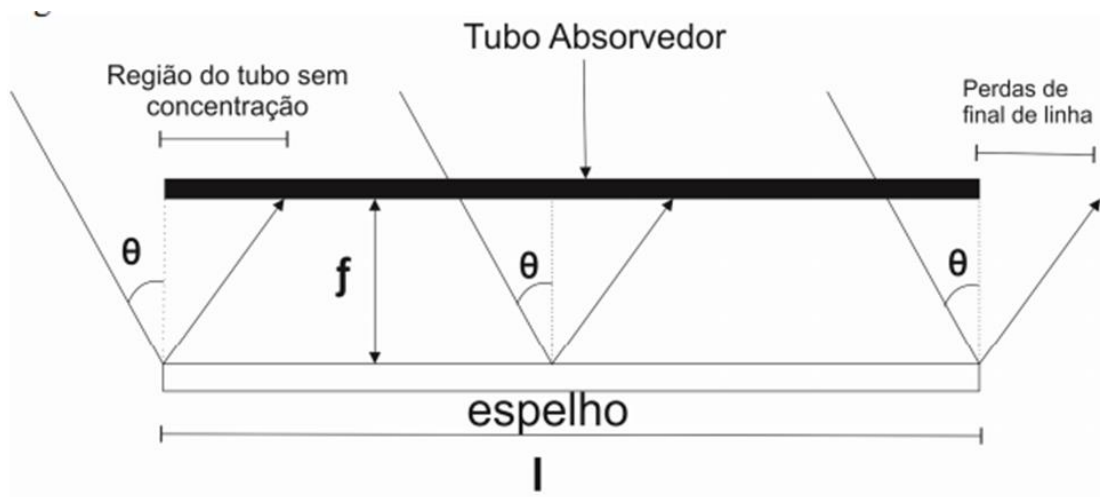
Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Durante os testes do coletor, Pigozzo Filho (2013) identificou uma das principais perdas inerentes a utilização do concentrador cilindro parabólico, que são as perdas de final de linha.

Essas perdas ocorrem devido a inclinação do posicionamento do Sol com relação a direção Norte-Sul. Assim parte da radiação refletida não atinge o tubo absorvedor, ao passo que o início do tubo não recebe nenhuma radiação refletida, como mostrado na Figura 4.21, onde

“ θ ” é a inclinação do Sol (Altitude) com relação a direção Norte-Sul, considerando um sistema de coordenadas horizontais, com o ângulo azimutal igual a zero.

Figura 4.21 - Representação de perdas de final de linha num Coletor Solar Cilindro Parabólico



Fonte: Pigozzo Filho (2013)

Essas perdas podem ser mensuradas segundo a equação 4.3 (Pigozzo Filho, 2013 apud Rabl, 1985):

$$\Gamma(\theta) = 1 - \frac{f}{l} \left(1 + \frac{w}{48 + f^2} \right) \tan \theta \quad 4.3$$

Onde,

- θ – Ângulo de incidência da radiação solar;
- $\Gamma(\theta)$ – Fator de perdas de final de linha;
- f – Distância focal;
- l – Comprimento do coletor;
- w – Abertura do coletor.

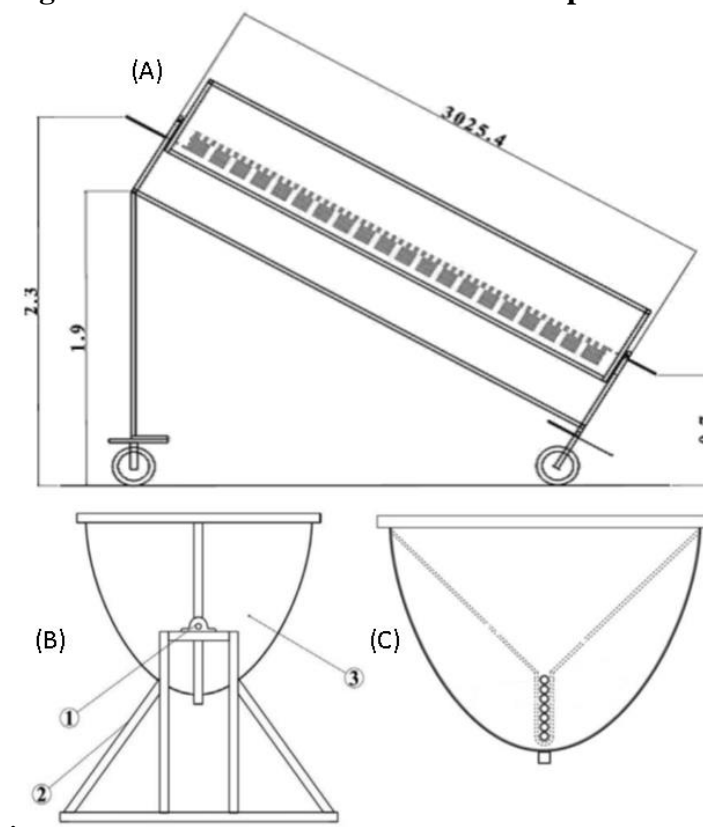
A partir da equação 4.3 pode-se fazer duas observações com relação a esse fenômeno. Em primeiro lugar, quanto menor for ângulo de inclinação do Sol, menor será a perda devido esse fenômeno. E em segundo lugar, essa perda será tão mais significativa quanto menor for a linha de coletor.

4.1.3 - Análise do rendimento térmico do aquecedor solar parabólico cilíndrico

Dissertação defendida na Universidade Estadual Paulista, no Campus de Guaratinguetá. Nesse trabalho, Mattos, (2011), realiza melhorias em um coletor solar do tipo cilindro parabólico, com o objetivo de obter maiores temperaturas na saída do coletor. Além dessa modificação, o autor também instala alguns instrumentos que permitam a ele realizar diversos testes térmicos no equipamento.

O coletor, como mostrado na Figura 4.22, foi projetado com o objetivo de alcançar temperaturas mais altas do que os coletores planos utilizados para aquecimento de água de banho e água de piscinas, que segundo o autor apresentam temperaturas na faixa de 25 a 30°C. Além desse ganho de temperatura, Mattos (2011) tinha por objetivo diminuir as perdas térmicas inerentes a coletores planos que trabalham a altas temperaturas.

Figura 4.22 - Vistas do coletor cilíndrico parabólico.



Fonte: Mattos (2011)

As principais dimensões do coletor são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Dados básicos do aquecedor.

ITEM	DIMENSÃO / UNIDADE
Área da placa reflexiva	3,6 m ²
Diâmetro do tubo	0,0095 m
Volume total interno da serpentina	1,94 m ³
Comprimento do tubo	2,8 m
Massa do aquecedor solar	95 kg

Fonte: Mattos (2011)

Esse trabalho possui três particularidades que serão discutidas a medida que forem analisadas seus subsistemas.

A primeira particularidade é identificada na estrutura de sustentação, que como pode-se observar na Figura 4.22 (A), é inclinada com relação ao solo. Embora não seja mencionado na dissertação, o objetivo dessa inclinação é diminuir as perdas de final de linha, que se deve a inclinação da componente direta da radiação solar na direção norte sul. Caso não haja regulagem essa inclinação deve ser igual à latitude do local onde será instalado.

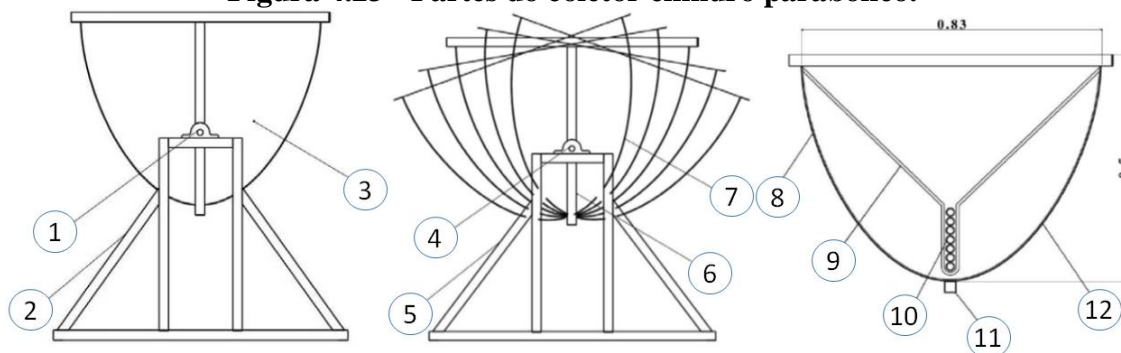
Outros coletores não utilizam essa inclinação por que geralmente são projetados para serem inseridos em grandes linhas (plantas solares) e nessa situação o ganho percentual de energia térmica não justifica o esforço e custo de se inclinar uma fila de coletores com relação ao solo.

A presente estrutura é feita de perfis metálicos e a sua descrição é dada na Figura 4.23. Suas partes são:

1. Articulação entre duas estruturas;
2. Estrutura metálica fixa;
3. Estrutura metálica parabólica móvel;
4. Mancal fixo;
5. Estrutura metálica fixa;
6. Estrutura metálica móvel;
7. Posicionamento em direção aos raios solares;
8. Revestimento metálico parabólico externo;
9. Guia equidistante de sustentação da serpentina;
10. Serpentina de cobre com o diâmetro de 9,5mm;

11. Estrutura metálica (tubos quadrados);
12. Revestimento metálico parabólico interno.

Figura 4.23 - Partes do coletor cilindro parabólico.



Fonte: Adaptado de Mattos (2011)

A segunda particularidade também é com relação à superfície refletora, pois a escolha de utilizar um ângulo de borda maior do que 90° , não é somente mais dispendiosa, uma vez que demanda uma maior quantidade de material para uma mesma área de coleta, pois as partes próximas a borda contribuem muito pouco com a quantidade de energia coletada.

Além do fator custo a escolha desse elevado ângulo de borda também aumenta as perdas por dispersão da radiação, uma vez que a radiação que incide próximo as bordas percorre um caminho mais longo até atingir o elemento absorvedor. Como a radiação solar direta chega com um certo desvio até a superfície refletora, quanto maior o caminho percorrido até o absorvedor, maior a dispersão, assim maior esse elemento absorvedor, condição que leva a altas perdas térmicas.

Uma outra particularidade desse coletor é com relação ao seu elemento absorvedor de radiação solar. Como mostrado na Figura 4.22 (C) e na Figura 4.24, o elemento absorvedor é formado por finos tubos de cobre dobrados de maneira a formar uma serpentina absorvedora de calor.

Figura 4.24 - Elemento absorvedor montado na coletor.



Fonte: Adaptado de Mattos (2011)

Como na situação anterior, o autor não informa o porquê de dispor o elemento absorvedor dessa maneira. Nesse caso como ele também não reporta como conseguiu a geometria parabólica do seu coletor, não podemos fazer muitas inferências. Entretanto, o que justificaria esse absorvedor disposto dessa maneira seria uma superfície refletora bastante irregular, o que causaria uma elevada dispersão dos raios solares, assim o projetista especificou um elemento absorvedor exageradamente grande, a fim de absorver a maior parte da radiação incidente no coletor que é refletida para o tubo absorvedor.

De qualquer maneira, caso tenha sido a hipótese aqui levantada ou não, o fato de projetista aumentar a área do elemento absorvedor irá aumentar as perdas térmicas, pois aumenta a área superficial do elemento absorvedor, bem como aumentando a troca térmica com o ambiente. Isto trata-se do mesmo problema que impede os coletores planos de trabalharem a alta temperatura.

Outra abordagem adotada pelo projetista em Mattos (2011) é a opção de utilizar um elemento absorvedor sem cobertura de vidro, mesmo utilizando um coletor com um ângulo de borda maior que 90° , pois mesmo que esse elevado ângulo de borda evite uma elevada perda por convecção livre, nada pode fazer a fim de retardar as perdas por convecção natural.

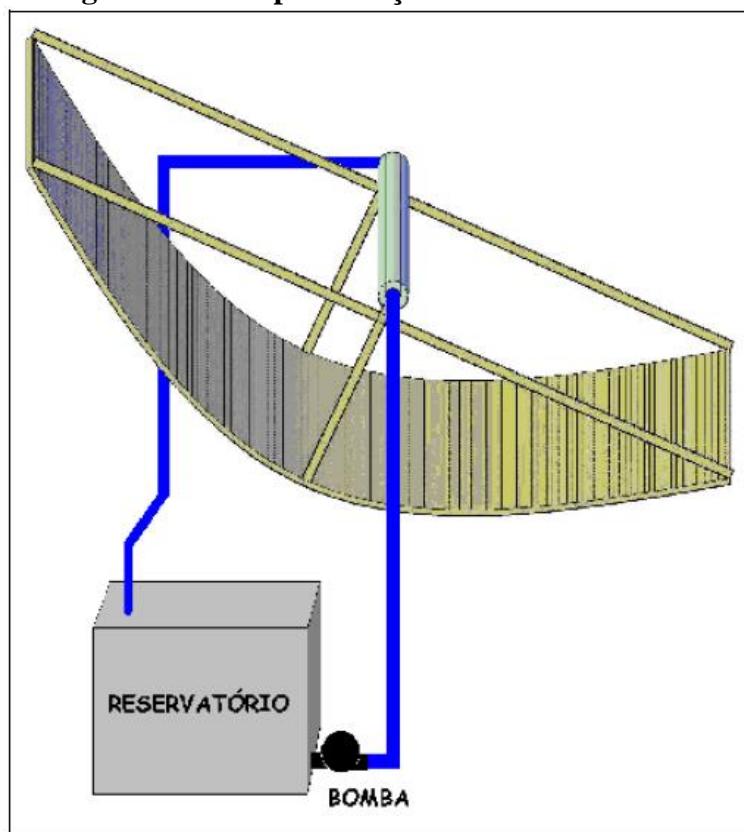
4.1.4 - Projeto e construção de um aquecedor solar concentrador

Esse trabalho de fim de curso, realizado por um aluno de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Seu objetivo era o fornecimento de água quente ($55 - 75^{\circ}\text{C}$) para a lavagem de louça e utensílios em uma cozinha industrial.

A escolha do coletor parabólico ocorreu por causa da temperatura necessária para a higienização. Temperatura que seria bem mais difícil de conseguir com coletores planos convencionais, além de demandar mais área para consegui-la.

Matrai (2008) dimensionou e fabricou um coletor concentrador cilindro parabólico de baixo custo, utilizando materiais comuns e de fácil manuseio e corte, com objetivo de tornar essa tecnologia mais atrativa comercialmente. Na Figura 4.25 tem-se a representação 3D do coletor.

Figura 4.25 - Representação 3D do coletor solar.



Fonte: Matrai (2008)

Na Figura 4.25 é possível observar o coletor e todas as outras partes que compõem a solução de aquecimento via energia solar. Esses outros componentes são um reservatório

térmico, a tubulação e bomba para movimentar o fluido. Mais detalhes sobre cada componente serão apresentados ao longo do texto.

Para o tubo coletor Matrai (2008), selecionou um tubo de cobre de 25mm, mesmo esse sendo um pouco mais caro que um tubo de alumínio, contudo o ganho na condutibilidade térmica faz do cobre o material com maior custo-benefício. Após a escolha, o autor utilizou uma cobertura de tinta preta fosca a fim de aumentar a absorvidade da radiação solar no tubo.

Com o intuito de minimizar as perdas por convecção o autor decidiu utilizar um tubo de vidro com tratamento antirreflexo, para evitar as perdas por reflexão. Esse tubo foi colocado recobrando o tubo de cobre e concentricamente a ele. Uma outra vantagem na utilização desse tubo de vidro é por que ele funciona como uma armadilha de radiação, pois ele é transparente aos comprimentos de onda mais energéticos da energia solar, mas é opaco para os longos comprimentos de onda da radiação emitida pelo tubo de cobre, funcionando como uma espécie de estufa, o que facilita o aquecimento do fluido.

Para confeccionar a superfície refletiva, foi utilizada uma folha de aço inox fixada nas costelas. Durante o projeto a escolha ficou entre o aço inox e uma folha de alumínio, contudo o aço inox apresentou um melhor custo-benefício.

Para o reservatório térmico foi utilizado um *cooler* de isopor, com objetivo de evitar perdas térmicas para o ambiente. Geralmente nas utilizações de energia solar opta-se por reservatórios térmicos com o objetivo de acumular o calor para ser utilizado quando for de interesse, além de permitir uma certa inércia térmica ao sistema que o permita funcionar, por exemplo, quando passar uma nuvem e encobrir temporariamente o campo de coleta.

Como é inerente a esse tipo de coletor, o mesmo deve contar com um sistema de rastreamento solar a fim de que o seu foco luminoso coincida com o seu foco geométrico. Contudo esse subsistema apresenta uma grande complicação que é a precisão desse movimento, que requer rotações da ordem de décimos de rpm para que atenda as especificações do sistema. A solução proposta por Matrai (2008) foi a utilização de um timer analógico de 12 horas (mostrado na Figura 4.27), uma vez que esse instrumento apresenta uma velocidade de giro que é exatamente o dobro da velocidade exigida pelo rastreador, bastando acoplar uma redução de 1:2 para que se consiga a rotação adequada.

Uma outra possibilidade levantada pelo autor seria acoplar dois desses timer a um redutor de velocidade, sendo realizado o teste observou que essa solução não seria viável, assim a correção do posicionamento desse coletor durante os teste foi feito manualmente.

Para o sistema de bombeamento foi utilizado uma bomba de aquário, pois a mesma fornecia a vazão necessária e baixo custo de aquisição. A Figura 4.26 mostra a bomba instalada dentro do *cooler*.

Figura 4.26 - Posicionamento da bomba no interior do reservatório.



Fonte: Matrai (2008)

A contribuição mais significativa desse trabalho de dissertação foi a confecção da estrutura que recebe a superfície refletora, uma vez que a mesma apresenta resistência mecânica e uma boa estética.

Figura 4.27 - Timer analógico.



Fonte: Site: <http://www.severoroth.com.br/eletronicos/timers/timer-analogico-para-instalacao-em-tomadas-tmaobc-exatron.html>, acesso em 17/05/2015

Como as demais estruturas de suporte da superfície refletora, essa também foi confeccionada a partir da união de diversas costelas. Para confeccionar essas costelas foi feito um desenho em ambiente CAD da parábola escolhida e depois foi impresso em escala real num papel A0, como mostra na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Modelo para corte da parábola



Fonte: Matrai (2008)

O corte foi realizado a partir do traçado na madeira, por meio do modelo mostrado. O corte se deu como mostra a Figura 4.29.

Após o corte das costelas, as mesmas foram unidas em uma estrutura, que depois recebeu a superfície refletiva. Essa foi fixada a estrutura a partir de parafusos, como mostra a Figura 4.30. A fixação da superfície por meio de parafuso é uma boa opção para projeto, pois permite melhor ajuste do posicionamento da superfície, ajuste esse que não seria conseguido com uma união fixa, como por exemplo rebites, embora esses últimos sejam uma clara escolha quando se pensa em custo e em possibilidade de folga.

Outra solução proposta por Matrai (2008) foi a fixação do tubo coletor na estrutura. Essa fixação é mostrada na Figura 4.31. O autor optou por esse tipo de conexão devido a fragilidade da madeira para que fosse fixado de outra maneira.

Figura 4.29 - Corte dos contornos da parábola.



Fonte: Matrai (2008)

Figura 4.30 - Fixação da superfície refletiva.



Fonte: Matrai (2008)

Figura 4.31 - Conexão do tubo absorvedor na estrutura do coletor.



Fonte: Matrai (2008)

O resultado da construção do coletor é mostrado na Figura 4.32.

Figura 4.32 - Coletor cilindro parabólico montado.



Fonte: Matrai (2008)

4.1.5 - Projeto e construção de um concentrador solar

Este trabalho foi um TCC desenvolvido na Escola Politécnica da USP, onde o objetivo girou em torno do projeto, da fabricação e testes de um coletor concentrador para o aquecimento de fluidos. Seu objetivo é o projeto e construção de um coletor de baixo custo que possa ser utilizado para aquecimento residencial.

Um outro aspecto que chamou bastante a atenção no trabalho de Kempfer foi a preocupação em se realizar um estudo de viabilidade econômica para o projeto. Ou seja, ele procurou desenvolver um projeto que atendesse necessidades reais de possíveis consumidores.

A fim de abarcar o maior número de necessidades dos consumidores, Kempfer, (2011), dividiu essas necessidades em quatro categorias, que são apresentadas na Tabela 4.2. Essas necessidades permitem ao projetista fazer uma melhor seleção dos requisitos e especificações, bem como nas demais fases de projeto, de maneira a adequar o coletor as necessidades do cliente.

Tabela 4.2 - Estabelecimento de necessidades.

Necessidades declaradas x reais	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo energético baseado em energia renovável - Tecnologia limpa - Protocolo de Kyoto - Atender a crescente demanda energética - Substituir tecnologias pré-existentes - Custo energético compatível com o praticado no mercado
Necessidades culturais	<ul style="list-style-type: none"> - Questões ambientais - Aquecimento global
Necessidades implícitas	<ul style="list-style-type: none"> - Independência de distribuição
Necessidades percebidas	<ul style="list-style-type: none"> - Estética moderna/tecnológica

Fonte: Kempfer (2011)

Após seu estudo (Projeto Informacional), Kempfer (2011) divide o projeto do coletor em três subsistemas:

- Coletor (aqui descrito como tubo absorvedor);
- Refletor (aqui descrito como superfície refletora);
- Estrutura.

onde o coletor é o subsistema que absorve a radiação que é refletida e concentrada pelo refletor e onde ambos são sustentados pela estrutura.

Um dos parâmetros mais importantes na fabricação de um coletor solar é a sua eficiência térmica, dessa forma o autor o apresenta de uma forma simplificada. Segundo ele, essa eficiência térmica seria analisada apenas no tocante a conversão de radiação solar para calor sensível no líquido, não levando em consideração a eficiência de transferência de calor desse fluido, analisado no processo o qual ele se destina (análise exegética).

O motivo de ter utilizado essa abordagem foi a escolha do processo. Como para aquecimento de água residencial, a temperatura da água é basicamente a temperatura que chegará ao chuveiro, essa abordagem é justificada. Contudo, caso queiramos usar esse coletor para uma aplicação industrial, teríamos que incluir mais uma análise na eficiência térmica, que seria a eficiência com a qual o calor transportado no fluido seria convertido novamente em calor para o processo.

Tendo em mente que o projeto da superfície refletora passa por uma abordagem puramente ótica e com a justificativa de que o seu coletor seja de baixo custo, o autor optou por um coletor com três superfícies refletoras menores, assim ele conseguia uma boa qualidade da superfície refletora e mantinha a área total. Dessa forma, o coletor é formado por três parábolas refletoras, cada uma com 1/3 da abertura total, como pode ser observada na Figura 4.33.

Tendo como alvo o atendimento do mercado de aquecimento residencial, Kempfer, (2011) estimou que um residência média consome em torno de 7kWh/dia. Assim com o objetivo de projetar um coletor que atenda a demanda de uma residência média e sabendo que na região Sul e Sudeste (Região onde o trabalho foi desenvolvido) a intensidade de radiação média é de 4kWh/m²/dia, o autor definiu que a área do seu coletor seria de 2 m², Sendo esse coletor capaz de atender as demandas de calor de uma residência média em qualquer lugar do Brasil.

Figura 4.33 - Perfis parabólicos do coletor.



Fonte: Kempfer (2011)

O traçado da geometria parabólica foi feito no plano x e y, utilizando a equação:

$$y^2 = 4fx \quad 4.4$$

onde f é a distância entre o foco e o vértice da parábola.

Por se tratar de um subsistema puramente ótico, a escolha do material passa necessariamente pela sua refletividade e pela sua capacidade de assumir a geometria parabólica. Assim optou-se pela utilização de uma chapa plana calandrada, de maneira a assumir a forma similar a uma parábola, pois esses desvios seriam corrigidos no momento em que ela fosse colocada sobre os suportes apresentados na Figura 4.33. Para efetuar a seleção de matérias Kempfer (2011), utilizou a Tabela 4. 3 e a partir dos critérios de custos, facilidade de obtenção e fabricação, o mesmo escolheu o alumínio em folha para fabricar a superfície refletora.

Objetivando uma correta configuração para o tubo absorvedor, Kempfer (2011), estudou os modos de absorção da radiação solar de coletores planos e coletores concentradores. Como resultado desse estudo ele chegou à conclusão que a melhor configuração seria:

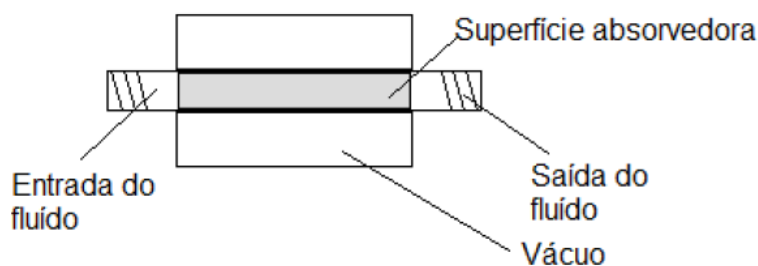
- Tubo absorvedor;
- Cobertura de material transparente;
- Conexões.

Tabela 4. 3 - Propriedades Radioativas Solares para materiais Seleccionados (T=300 K).

Descrição/Componente	ρ_s	ε
Alumínio		
Polido	0,91	0,03
Anodizado	0,86	0,84
Revestido de quartzo	0,89	0,37
Folha	0,85	0,05
Tintas		
Branca, óxido de zinco	0,84	0,93
Branca, acrílica	0,74	0,90

Fonte: Kempfer (2011)

Essa solução apresentada na Figura 4.34, utiliza um absorvedor metálico recoberto por um tubo transparente a radiação solar e onde ambos seriam unidos por um material com baixa condutibilidade térmica.

Figura 4.34 - Projeto Conceitual do tubo absorvedor.

Fonte: Kempfer (2011)

A partir das definições mostradas acima, o autor iniciou o processo da seleção de materiais que atendessem a restrições específicas para cada subsistema.

Para a seleção do tubo absorvedor, foram levados em consideração duas propriedades do material: Condutividade térmica e absorvidade térmica. A priori foram selecionados o alumínio e o cobre devido a facilidade de obtenção e suas elevadas condutibilidades térmicas. Em um segundo momento deu-se preferência ao cobre, uma vez que ocasionaria um pequeno aumento de custos, que seria compensado pelo aumento na condutibilidade térmica.

Com relação à absortividade, foi utilizado a Tabela 4.4. Pode-se observar que a melhor escolha seria uma superfície revestida por óxidos, como, por exemplo, o óxido de cromo negro, uma vez que esse absorveria a maior quantidade de radiação solar e apresentaria menos perdas. Entretanto essa superfície é de difícil obtenção e apresenta um valor elevado (no ponto de vista do autor), por esse motivo ele optou por utilizar o tubo de cobre pintado com uma tinta preta, mesmo ciente das perdas térmicas que essa escolha acarretaria.

Tabela 4.4 - Propriedades radioativas solares para materiais selecionados ($T = 300\text{ K}$).

Descrição/Componente	α_s	ϵ
Metal, revestido		
Sulfeto negro	0,92	0,10
Óxido de cobalto negro	0,93	0,30
Óxido de níquel negro	0,92	0,08
Cromo negro	0,87	0,09
Placa de metal galvanizada		
Limpa, nova	0,65	0,13
Oxidada ao tempo	0,80	0,28
Tintas		
Negras (Parsons)	0,98	0,98
Branca, acrílica	0,26	0,90

Fonte: Kempfer (2011)

Para a seleção do tubo transparente que recobriria o tubo absorvedor, levou-se em consideração a seleção de certos materiais poliméricos que se apresentam praticamente transparentes a radiação na faixa de comprimentos de onda apresentados pela luz solar. Contudo esses materiais apresentam custos proibitivos para serem utilizados nesse projeto. A partir dessa constatação, observou-se que os materiais mais interessantes são o quartzo fundido, vidro de baixo conteúdo de ferro e lucite, como observado na Figura 4.36.

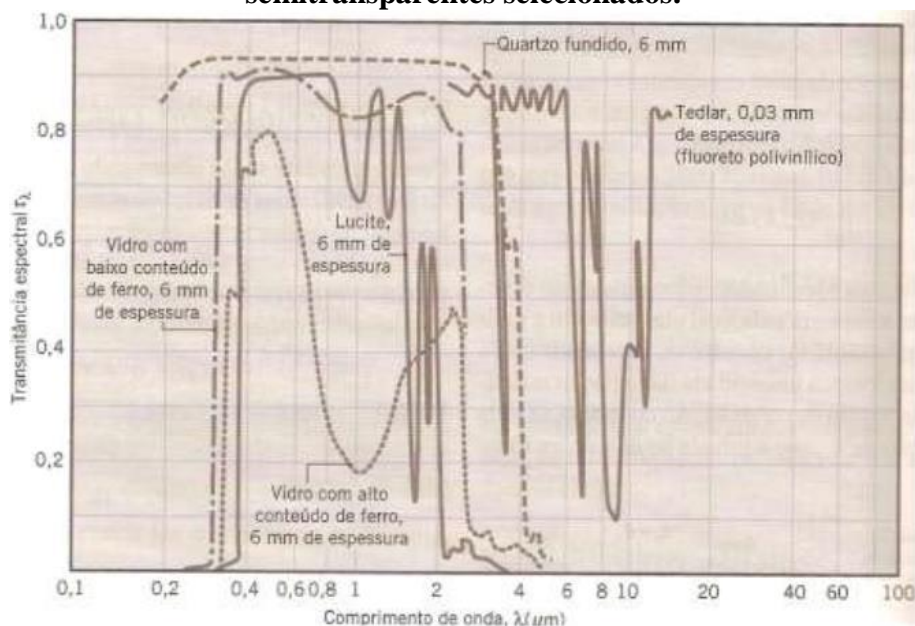
Figura 4.35 - Tubos absorvedores utilizados no coletor



Fonte: Kempfer (2011)

Entretanto esses materiais também apresentavam custos que estavam além do orçamento disponível para o projeto. Assim o melhor custo/benefício foi encontrado no vidro comum (alto conteúdo de ferro), pois ele apresenta uma transmissibilidade a radiação solar, relativamente alta (0,79) e está disponível no comércio em vários diâmetros e tamanhos, além de apresentar um custo acessível.

Figura 4.36- Dependência espectral das transmitâncias espectrais de materiais semitransparentes selecionados.



Fonte: Incropera 2011 apud Kempfer (2011)

As conexões utilizadas nos tubos absorvedores devem ser fabricadas de um material que apresente baixa condutividade térmica, caso contrário haverá perdas pelo contato do tubo absorvedor e pela tubulação externa ao coletor, que pode não apresentar um isolamento térmico adequado aquela temperatura.

O autor optou por fazer as conexões de Politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon. A escolha foi motivada pelo elevado ponto de fusão (327°C) e a sua baixa condutividade térmica ($k = 0,35 \text{ W/m.K}$). A Figura 4.37, mostra as conexões utilizadas.

Figura 4.37 - Conexões de PTFE.



Fonte: Kempfer (2011)

A fim desse processo, as partes foram unidas, como mostra a Figura 4.38.

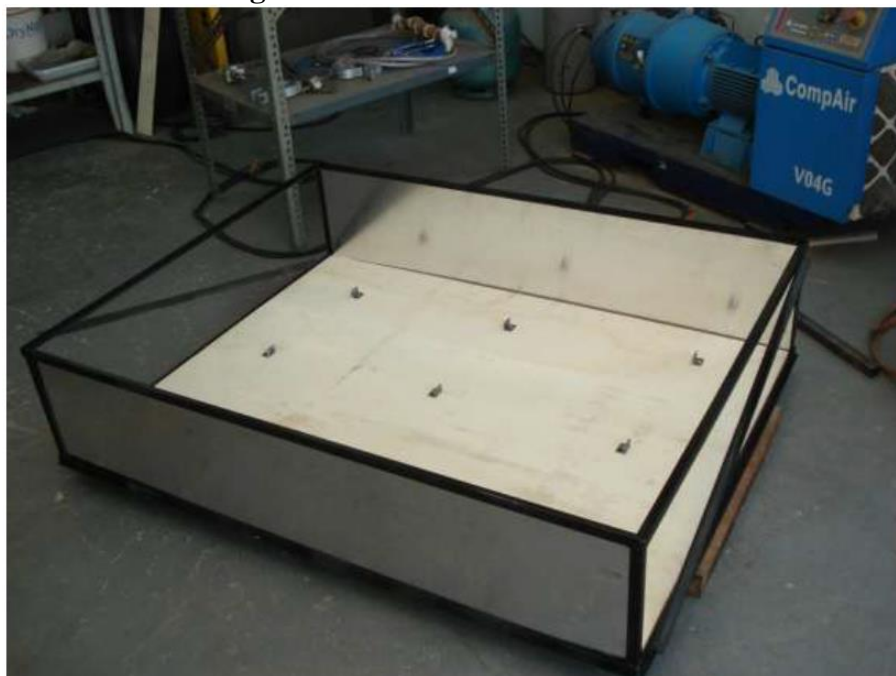
Figura 4.38 - Tubos absorvedores utilizadas.



Fonte: Kempfer (2011)

O projeto da estrutura segue uma linha de raciocínio, muito próxima a utilizada por coletores planos. Ela se configura como uma caixa que receberá a superfície refletiva e o absorvedor, como mostrado na Figura 4.39.

Figura 4.39 - Estrutura do coletor.



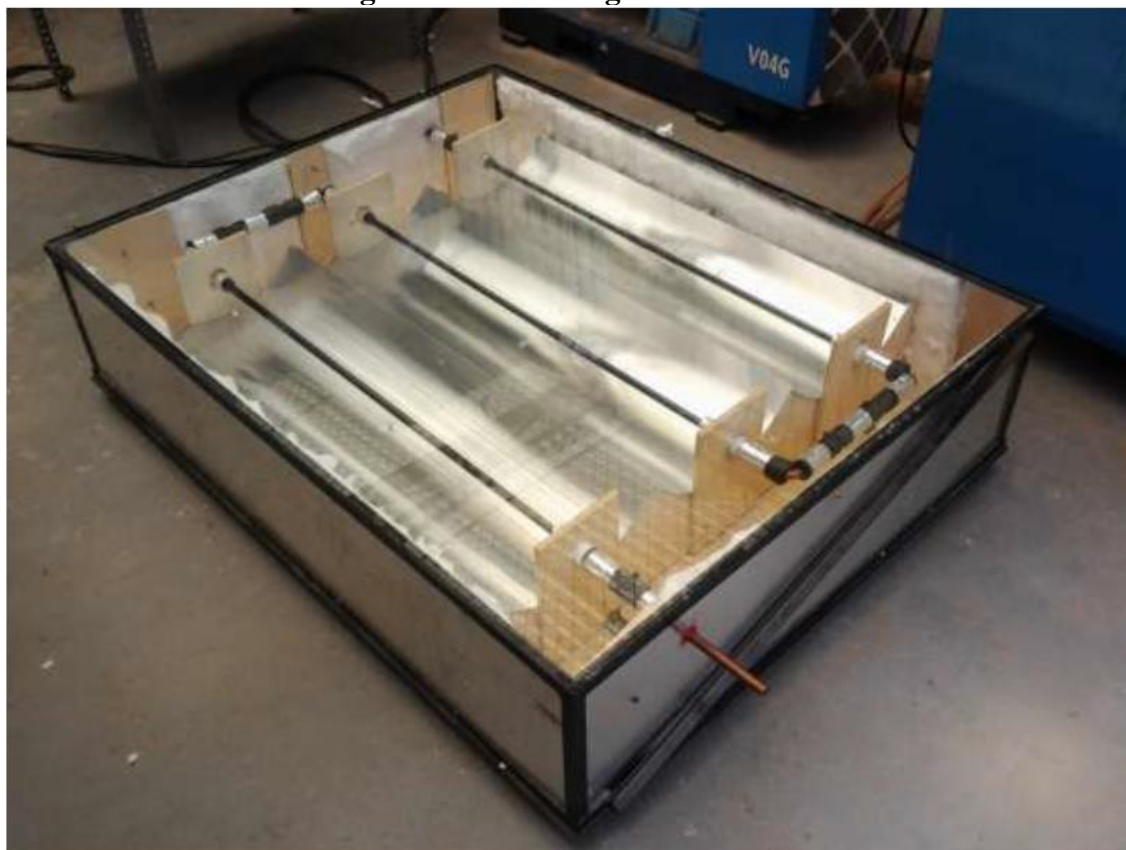
Fonte: Kempfer (2011)

Essa caixa receberam as estruturas suporte para a superfície seletiva e as tubulações que conduziram o fluido, como mostrado na Figura 4.40.

A partir da Figura 4.40 podemos fazer algumas análises desse coletor. A primeira delas se trata de coletor híbrido, uma vez que guarda características tanto de um coletor concentrador do tipo cilindro parabólico, quanto de um coletor plano comercial.

A característica de um coletor concentrador é devido a forma da sua superfície refletora que concentra os raios solares em um tubo absorvedor em seu foco. Quanto as características de um coletor plano, temos o fato de todo o coletor ser alojado em uma caixa recoberta por vidro, bem como de que em um único passe, o fluido seja conduzido por todos os três concentradores. O objetivo da cobertura de vidro é elevar a temperatura interna do coletor, de maneira a diminuir as perdas internas de calor por meio de condução, já o objetivo de fazer o fluido passar de uma única vez por todos os coletores diminui as perdas de carga (evitando as perdas inerentes ao fluido entrar e sair várias vezes do coletor) e eleva a temperatura na saída, dessa maneira necessitando de menos passes para que o fluido atinja a temperatura desejada.

Figura 4.40 - Montagem do coletor.



Fonte: Kempfer (2011)

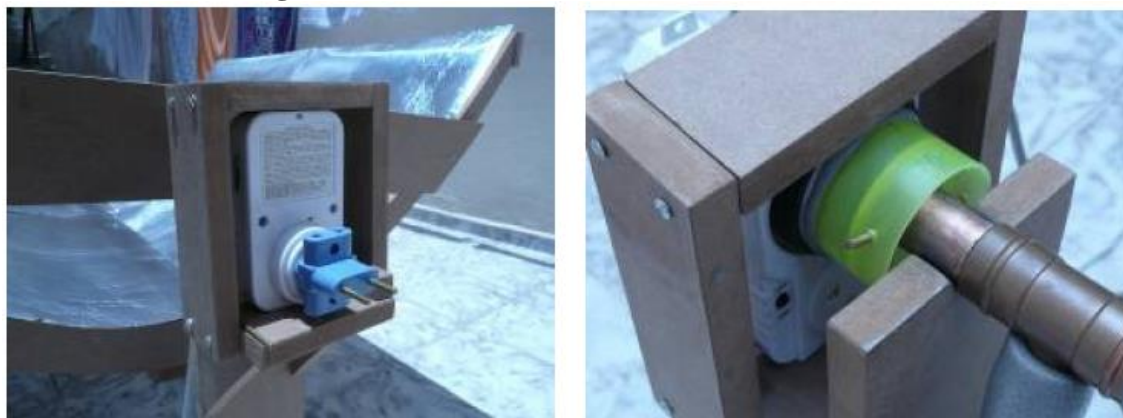
4.1.6 - Projeto e construção de um aquecedor solar com concentrador

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido no departamento de Engenharia Mecânica na escola Politécnica da Universidade de São Paulo, cujo objetivo é o projeto de aquecedor solar residencial de baixo custo.

Esse trabalho realizado por Ho e Ito (2007), guarda muitas semelhanças com o trabalho realizado por Matrai (2008). O motivo dessa semelhança é o fato de terem sido desenvolvidos no mesmo laboratório e sobre a supervisão do mesmo orientador, o Eitaro Yamane.

Diferentemente do abordado no trabalho de Matrai (2008), Ho e Ito (2007) construíram uma estrutura leve o suficiente de maneira a poder utilizar como sistema de rastreamento um timer analógico. A montagem apresentada na Figura 4.41 mostra o timer acoplado na estrutura do coletor.

Figura 4.41 - Sistema de rastreamento adotado.



Fonte: Ho e Ito (2007)

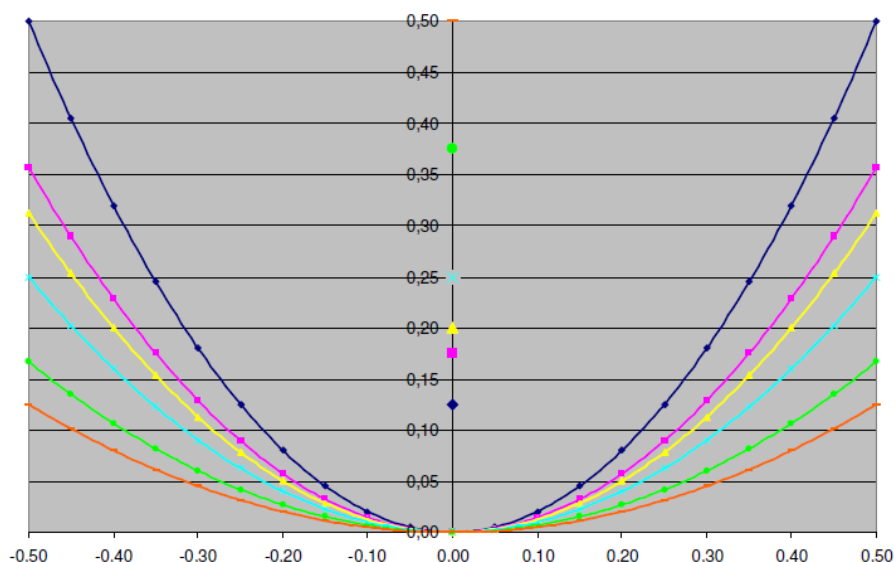
Entretanto durante os testes, o timer quebrou devido excesso de esforço e a partir desse momento o controle teve de ser manual. Suponho que o sobre esforço deva ter sido causada por rajadas de ventos que incidiram sobre o coletor, elevando assim o torque a um valor superior ao suportado pelo timer.

Com relação à abordagem utilizada para realização do rastreo, ela com certeza é bastante engenhosa, entretanto pouco eficiente. A abordagem de utilizar um sistema de rastreo que permaneça o tempo todo atuado confere um pequeno aumento a eficiência do sistema, ganho que é perdido devido ao excesso de energia gasto para manter o sistema funcionando durante todo o dia.

Analisando a superfície refletora, os pesquisadores optaram por utilizar um ângulo de borda maior do que 90° , embora estivessem cientes que esse apresentava um maior custo para fabricação de superfície refletora. Os motivos foram uma melhor distribuição da radiação sobre o tubo absorvedor, além de permitir usar uma cobertura de vidro no coletor (caso seja desejado), artifício que torna mais fácil a manutenção periódica de limpeza do mesmo.

Para decidir qual seria o ângulo de borda adequado os pesquisadores, fizeram uso do gráfico mostrado na Figura 4.42. A partir desse gráfico foi escolhido a linha cor de rosa, cuja distância focal é de 0,175 metros.

Figura 4.42 - Gráfico para a determinação do angulo de borda.

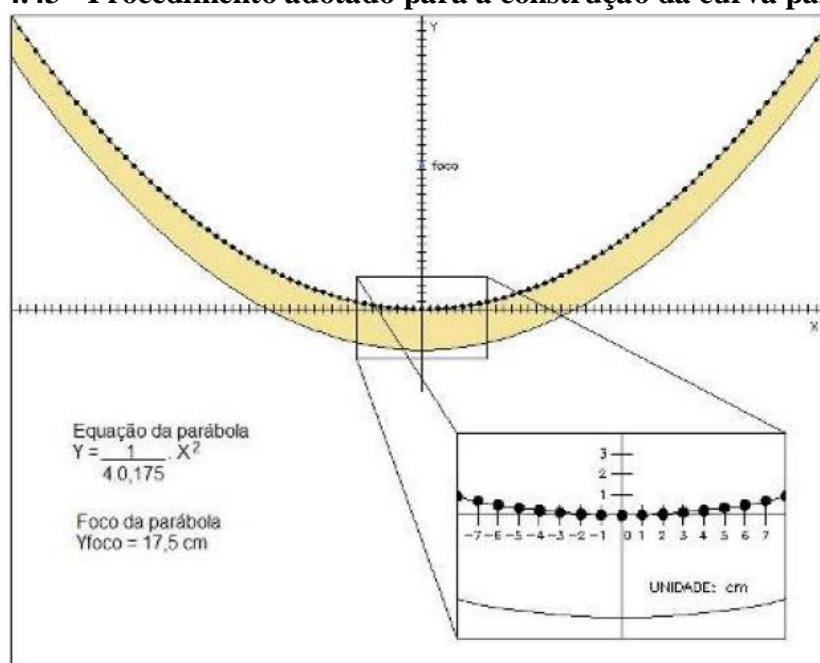


Fonte: Ho e Ito (2007)

A partir dessa escolha foi iniciada a fase de fabricação do perfil parabólico. Uma das opções cogitada pelo pesquisador foi a de desenhar essa geometria em um software de modelagem 3D, plotado e impresso o perfil parabólico na escala de 1:1, contudo ele preferiu utilizar uma abordagem de marcação de pontos, mostrado na Figura 4.43, com a justificativa de que se utilizasse o desenho haveria complicações como certas distorções que aparecem na hora da impressão. Por esse motivo a abordagem de marcação de pontos na madeira, para depois a mesma fosse cortada, lhe pareceu a maneira mais precisa de se obter a superfície parabólica.

Após a marcação foram cortadas três perfis a fim compor a estrutura final, mostrada na Figura 4.44. Foram utilizadas três costelas, provavelmente a fim de melhorar as qualidades estruturais do coletor, evitando assim distorções devido, por exemplo, a carga de vento ao qual o mesmo seria submetido quando fosse colocado em testes em campo.

Figura 4.43 - Procedimento adotado para a construção da curva parabólica.



Fonte: Ho e Ito (2007)

Figura 4.44 - Estrutura da calha parabólica.



Fonte: Ho e Ito (2007)

Uma outra solução interessante encontrada pelos pesquisadores foi dada no projeto do tubo absorvedor. Para esse subsistema foi utilizado um tubo de cobre recoberto com tinta preta fosca a fim de aumentar a sua propriedade de absorção de energia solar. A novidade foi sugerida na cobertura do tubo absorvedor, onde foram utilizados anéis feito de material polimérico que serviam de base onde seria recoberto por transparências (no passado utilizada por projetores), para que dessa maneira permitisse a entrada da radiação solar e diminuísse as perdas por

convecção. A ressalva que se pode fazer com relação a essa solução é que, mesmo de baixo custo, o fato de utilizar material polimérico convencional para aplicações solares traz sérios problemas de vida útil. Mas caso isso seja previsto nas manutenções, essa se configura como adequada. A Figura 4.45 mostra o tubo absorvedor utilizado.

Figura 4.45 - Tubo absorvedor utilizado.



Fonte: Ho e Ito (2007)

Outra particularidade desse projeto é o fato de o tubo absorvedor também ser utilizado como suporte para o coletor, como mostrado na Figura 4.46. Essa configuração, que pode ser aproximada por um mancal de deslizamento, pode ter ajudado no aumento excessivo do esforço sobre o timer. Por se tratar de um mancal de deslizamento, as piores condições de trabalho são encontradas a pequenas velocidades angulares (como as requeridas pelo coletor). Uma possível melhoria para esse protótipo seria utilizar mancal de rolamento, condição que possivelmente melhoraria o uso do timer como sistema de rastreamento solar.

Figura 4.46 - Sistema de movimentação do coletor.



Fonte: Ho e Ito (2007)

Entretanto a solução mais original é dada para solucionar o subsistema da superfície refletora. Para isso os pesquisadores decidiram recobrir uma folha de papel cartão com papel alumínio. Contudo, devido a sua fina espessura, trabalhar com papel alumínio exige muita técnica, uma vez que qualquer irregularidade na superfície ira incorrer em perdas óticas no coletor. Nos primeiros testes as superfícies obtidas se mostraram inviáveis devido a quantidade de bolhas e irregularidades, como mostrado na Figura 4.47 (A).

Figura 4.47 - Testes de aplicação do papel alumínio.



Fonte: Ho e Ito (2007)

Após uma série de tentativas, observou-se que, ao invés de espalhar a cola no papel cartão e tentar fixar o papel alumínio (Caso A), o correto seria espalhar colar sobre o papel alumínio antes do mesmo ser colocado sobre o papel cartão. A partir desse procedimento foi conseguida uma aplicação similar à mostrada na Figura 4.47 (B), que embora não esteja perfeita, estava adequada às necessidades do projeto.

Depois dessa aplicação o papel cartão foi cortado a fim de formar três folhas que foram fixadas sob as costelas do coletor, como mostra a Figura 4.48.

Figura 4.48 - Protótipo do coletor.



Fonte: Ho e Ito (2007)

4.1.7 - Projeto, fabricação e testes experimentais de um coletor solar cilindro parabólico com sistema de rastreamento automático

Trabalho desenvolvido por pesquisadores do Departamento de Engenharia Mecânica das Universidades East West Institute of Technology e Ambedkar Institute of Technology, ambas localizadas em Bangalore, Índia.

Um dos motivos pelos quais foi escolhido esse tipo de coletor em detrimento dos coletores planos é o fato do custo da superfície absorvedora ser maior que o da superfície refletora, assim é mais vantajoso aumentar a superfície refletora e concentrar toda a radiação

que sob ela incide, em uma pequena superfície absorvedora, a qual adquirirá a maior parte da energia térmica que incidiu sobre ela.

Por se tratar de equipamento de baixo custo, foi levantada a possibilidade de posicionar o absorvedor com o seu eixo longitudinal, paralelo à direção Leste-Oeste. Embora, tenha-se a ciência de que essa não é a escolha que proporcione maior absorção térmica, sua adoção tornaria desnecessária a utilização de um sistema de rastreamento solar automatizado, bastando somente efetuar uma correção a cada estação do ano.

O presente projeto de coletor apresenta os seguintes objetivos

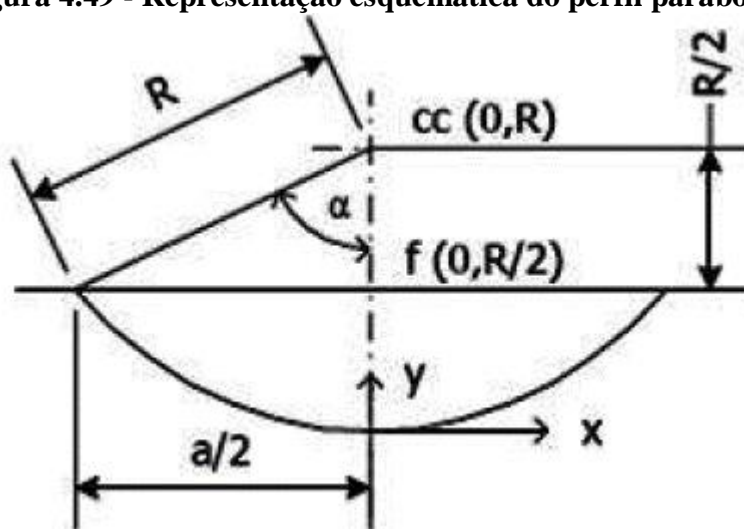
- a) O projeto de um Coletor Solar Cilindro Parabólico;
- b) Tornar o custo-benefício do coletor solar atraente para cidadãos comuns;
- c) Desenvolver um sistema de rastreamento automatizado, que permita acompanhar o Sol, quando o eixo longitudinal do coletor estiver paralelo a direção Norte-Sul;
- d) Sistema que requisiite o mínimo de intervenção humana.

A fim de organizar o projeto do coletor solar, os autores dividiram o seu projeto em quatro subsistemas:

- Superfície refletora;
- Tubo absorvedor;
- Estrutura;
- Sistema de rastreamento solar automático.

Para o projeto da superfície refletora foi utilizada a representação mostrada na Figura 4.49

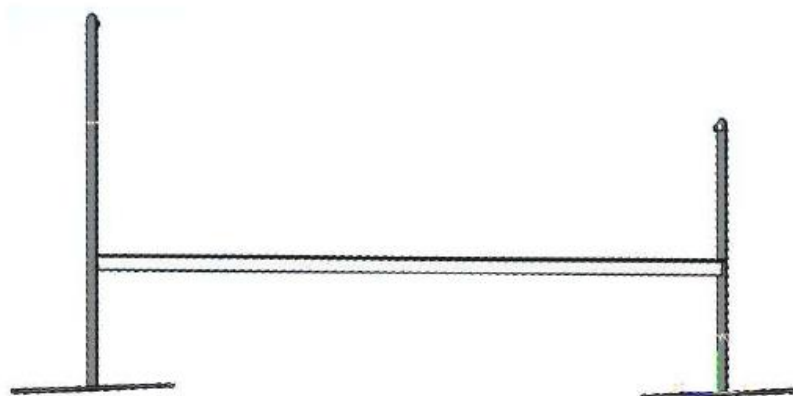
Figura 4.49 - Representação esquemática do perfil parabólico.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

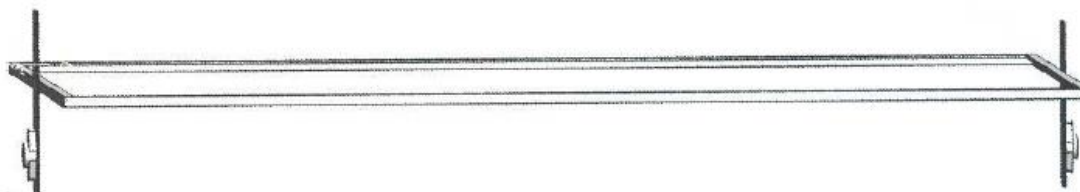
Os perfis da estrutura foram construídos a partir de perfis de aço doce soldados. A partir desse processo foi construída a estrutura que sustenta todo o coletor, como mostrado na Figura 4.50 e a caixa da superfície refletora, mostrada na Figura 4.50.

Figura 4.50 - Suporte do coletor solar.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Figura 4.51 - Suporte para a superfície refletora.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Para a fixação do tubo absorvedor foi utilizado uma chapa fina fixada à estrutura, como mostrada na Figura 4.52.

Figura 4.52 - Suporte do tubo absorvedor.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Devido uma questão de custo no projeto, optou-se pela utilização de um tubo absorvedor de cromo, sem cobertura de vidro. A escolha do cromo se deu devido À praticidade e foi escolhido depois de considerar diversos parâmetros como a velocidade do fluido no interior do tubo, a fabricação e as perdas térmicas apresentadas por esse material. O tubo absorvedor é mostrado na Figura 4.53.

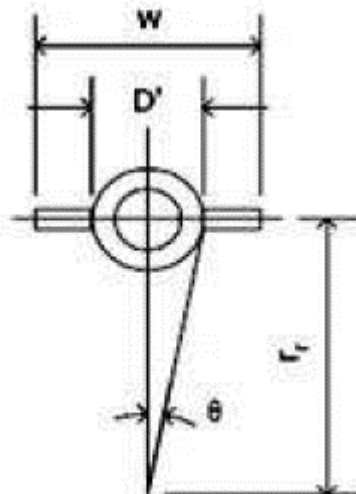
Figura 4.53 - Tubo absorvedor utilizado no coletor.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Para o dimensionamento dessa superfície absorvedora, os autores utilizaram a Figura 4.54.

Figura 4.54 - Seção transversal do tubo absorvedor.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Onde,

$$D = 2r_r \cdot \sin \theta$$

Observamos também na Figura 4.54 que a fim de melhorar o fator de interceptação, foi colocado duas hastes, formando aletas nas laterais dos tubos. Vale observar que essa abordagem pode induzir a uma maior perda de calor, que talvez não compense o ganho gerado pelo aumento do fator de interceptação.

No projeto da superfície refletora foram utilizadas duas abordagens. A primeira abordagem utilizava uma folha de alumínio polido, como mostrado na Figura 4.55. Nessa configuração a folha de alumínio era conformada pela estrutura a fim de que adquirisse uma forma parabólica e concentrasse toda a radiação que incidisse perpendicular ao coletor.

Figura 4.55 - Superfície refletora feita a partir de alumínio polido.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

A outra abordagem utilizada foi a de atingir a superfície parabólica a partir de finas lâminas de espelho fixadas a estrutura do coletor. Essa configuração é mostrada na Figura 4.56.

Figura 4.56 - Superfície refletora feita a partir de finas lâminas de vidro.



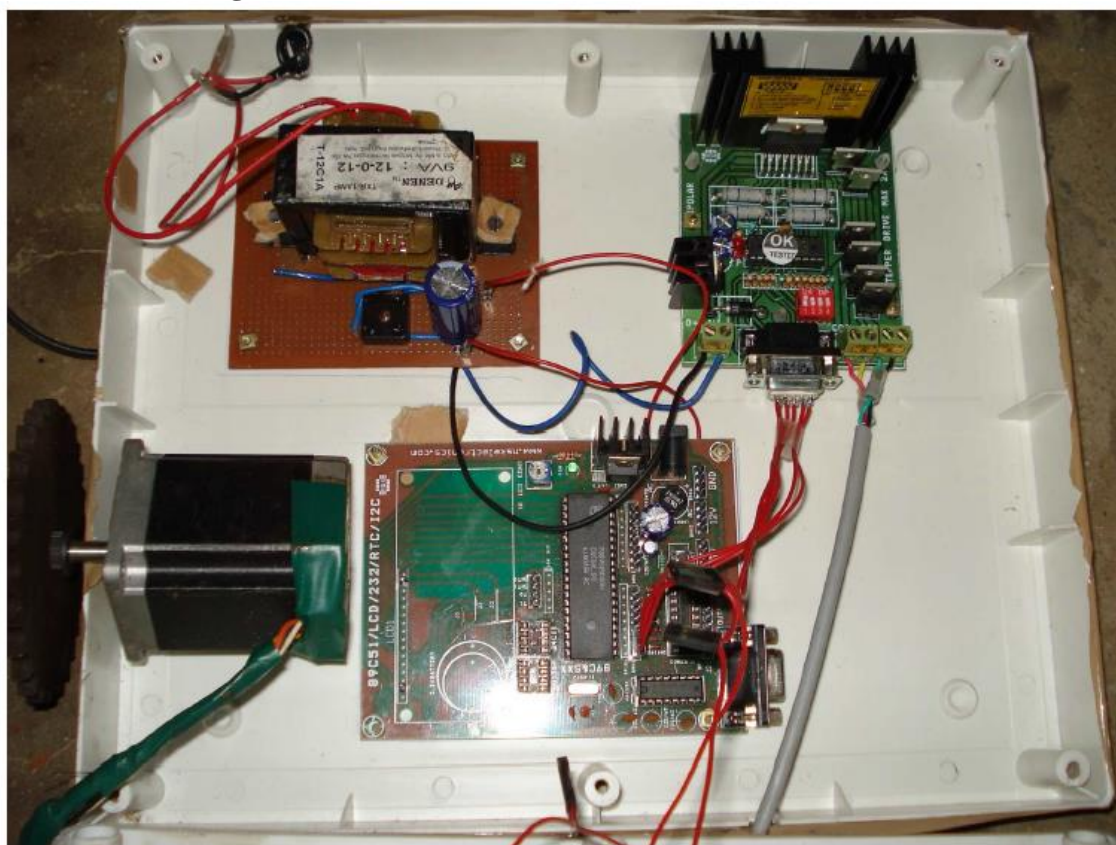
Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

O objetivo da utilização desses dois tipos de superfície é a avaliação de qual delas apresenta um maior custo-benefício.

No projeto do sistema de rastreamento, foi identificado que o Sol move-se $0,25^\circ/\text{minuto}$, assim o sistema de rastreamento teria que apresentar essa velocidade para que se tivesse um rastreamento perfeito. Contudo, optou-se efetuar a correção a cada 30 minutos, uma vez que $7,5^\circ$ foi considerado como um erro aceitável para esse sistema. Essa escolha do aumento no tempo entre acionamento do sistema de rastreamento ocorreu devido ao consumo de energia gerado pelo rastreamento. Como os autores tinham como o seu principal requisito o baixo custo do sistema, foi optado por esse intervalo a fim de diminuir o consumo de energia elétrica.

A partir desses requisitos e especificações foram escolhidos um motor de passo, um sistema de acionamento composto por pinhão e corrente e um micro controlador. O sistema de rastreamento montado é mostrado na Figura 4.57.

Figura 4.57 - Sistema de controle do rastreador solar.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

A utilização do motor de passo ocorreu pela necessidade de ser conseguir posicionamentos precisos em intervalos de tempo definidos.

Os testes do coletor são mostrados na Figura 4.58. Observa-se na montagem apresentada que os autores optaram por fazer uma elevação no coletor. Essa elevação tem por objetivo a minimização das perdas de final de linha, contudo geralmente é inviável a utilização dessa elevação em instalação de fornecimento de calor, uma vez que as linhas que a compõem tem dezenas de metros e seria muito dispendioso a colocação de um ajuste de elevação.

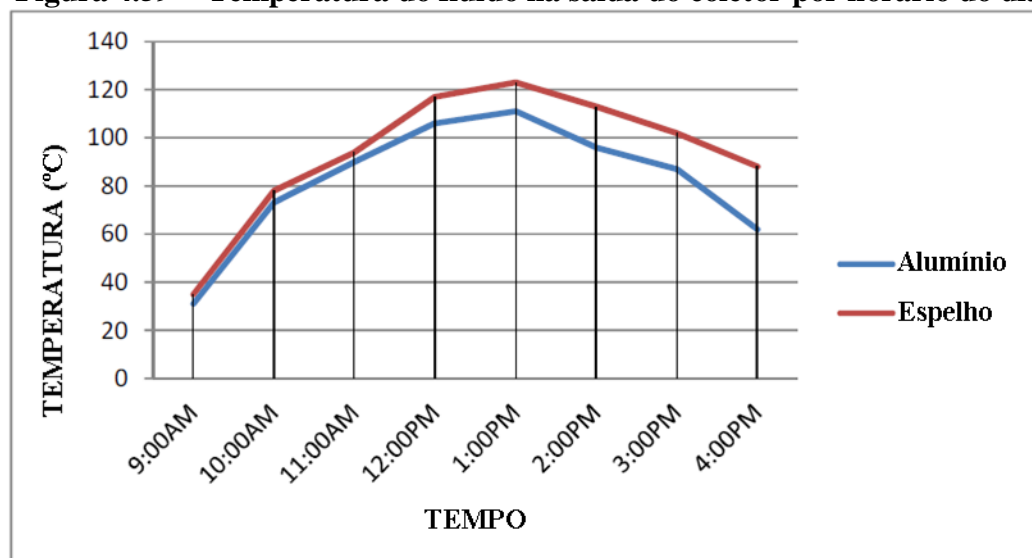
Figura 4.58 - Montagem do coletor com a superfície de refletora (A) Alumínio Polido e (B) lâminas de vidro.



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

O principal resultado desse trabalho é a comparação entre os dois tipos de superfícies refletoras utilizadas. Esse resultado é mostrado na Figura 4.59, por meio do gráfico apresentado percebe-se que a superfície formada por finas lâminas de espelho apresentou melhores resultados do que a superfície de alumínio polido. Considerando que o alumínio polido apresenta uma refletividade maior que a do vidro comercial (como já apresentado), o motivo do espelho ter apresentado melhores resultados se deve ao fato da sua superfície refletora apresentar um melhor fator de interceptação. Esse melhor fator de interceptação é consequência de uma melhor aproximação de um perfil perfeitamente parabólico, alcançado pela superfície formada por lâminas de vidro.

Figura 4.59 - Temperatura do fluido na saída do coletor por horário do dia



Fonte: Kumar, Srinath e Reddy (2013)

Aqui finaliza-se o estudo de fontes acadêmicas, como teses, dissertações e artigos. Uma outra grande fonte de informações para o projeto de equipamentos pode ser acessado via banco de patentes.

A patente é um documento com caráter técnico e jurídico, que tem por objetivo, habilitar a execução da matéria técnica que está sendo protegida, por um técnico no assunto. Como a sua finalidade é puramente técnica, ela não apresenta equações nem leis fundamentais que regem o fenômeno, entretanto se apresenta como um oásis de informações no quesito de aspectos construtivos e de fabricação de equipamentos.

Pelos motivos acima abordados, foram analisadas diversas patentes dentro do período de Projeto Informacional. A seguir são mostradas as mais relevantes para essa dissertação.

4.1.8 - Projeto e Fabricação de um Coletor Solar Cilindro Parabólico para Fins Educacionais

Este trabalho consiste no projeto fabricação e testes de uma bancada educacional, que tem por finalidade, demonstrações do uso de energias renováveis e de conversão de energia.

A escolha desse tipo de coletor ocorreu devido a faixa de temperatura no qual esse pode trabalhar, o que traz liberdade para os pesquisadores fazerem diversos experimentos, usando apenas esse equipamento.

A fim de facilitar o desenvolvimento desse sistema, os pesquisadores dividiram o seu projeto em quatro subsistemas:

- Refletor Parabólico;
- Tubo Absorvedor;
- Potência de Alimentação;
- Sistema de Rastreamento Solar.

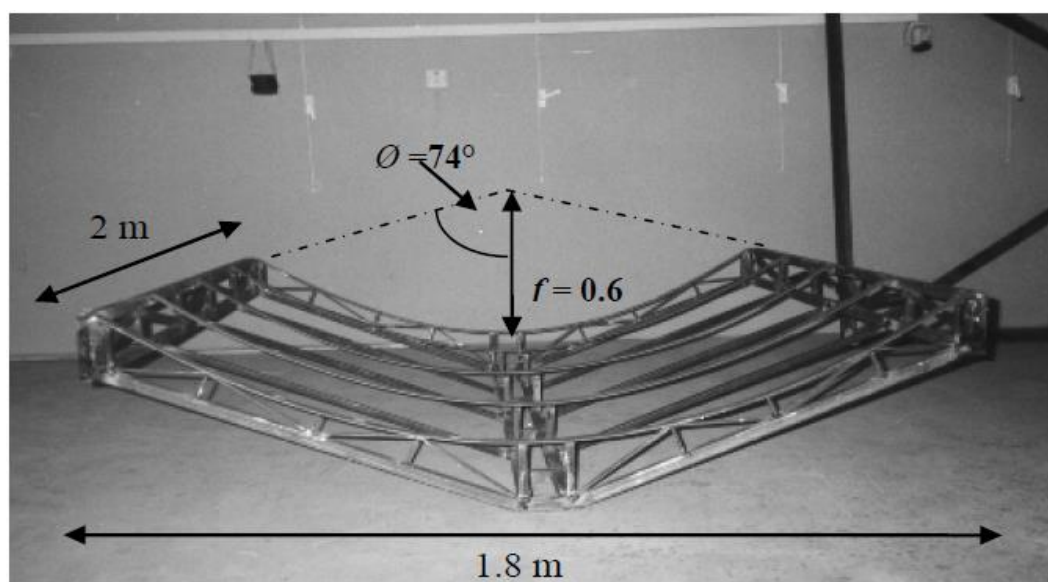
A partir de agora, passar-se-á a analisar como foram desenvolvido todos esses subsistemas. Vale aqui ressaltar que, devido à falta de informação inerente a análises de artigos, diversas análises são realizadas com base nos desenhos e experiência.

Para o projeto do refletor parabólico, foi utilizada uma estrutura treliçada, mostrada na Figura 4.60. Para o seu coletor o autor optou por utilizar um ângulo de borda de $74^\circ (< 90^\circ)$, escolha que lhe proporciona uma economia na estrutura e por consequência na superfície de controle, além de diminuído a distância entre a superfície refletora e o tubo absorvedor,

aumentando o fator de interceptação do coletor. Decisão que melhora a eficiência do seu coletor.

Devido às elevadas cargas de vento, presentes no local onde seria instalado o coletor, a estrutura teve que ser projetada com alta rigidez. Caso não possuísse tal rigidez, as deformações causadas pelo vento deformariam a superfície, diminuindo assim o seu fator de interceptação.

Figura 4.60 - Estrutura da superfície refletora utilizada no Coletor Solar de Calha Parabólica.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

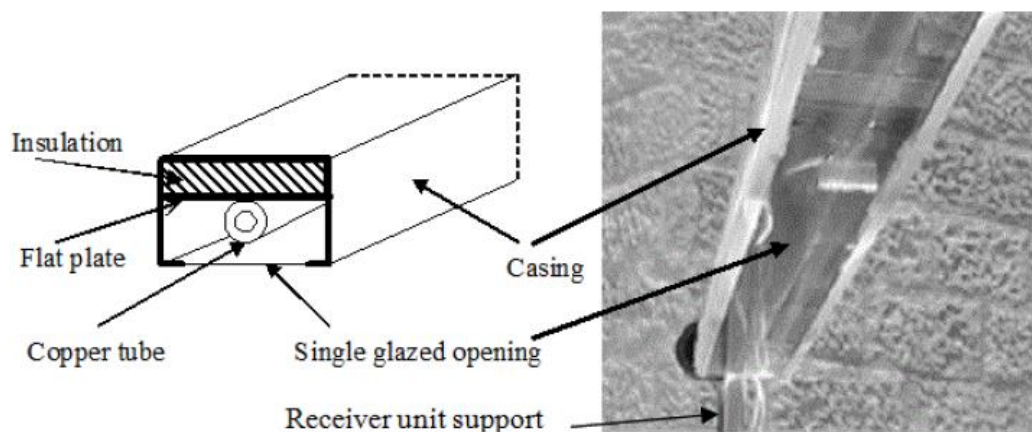
A fixação da superfície refletora é feita a partir de abas nas extremidades do coletor, que permitem a inserção da folha metálica e a partir de indução de pequena deformação na folha, faz com que essa permaneça fixa a estrutura.

Cientes que o vento representaria uma elevada perda térmica no tubo absorvedor do coletor solar, os pesquisadores projetaram um tubo absorvedor, onde o recobrimento é feito a partir de uma calha fechada, onde uma das faces é de vidro. O autor utiliza essa abordagem por julgar ter um melhor custo-benefício do que a colocação de um tubo de vidro concêntrico a um tubo absorvedor. Para isso eles criaram uma calha de isolamento, como mostrado na Figura 4.61. Essa calha apresenta uma construção mais simplificada e é muito semelhante a utilizada pelos coletores lineares Fresnel.

Assim essa calha com isolamento, inibe a perda de calor para o ambiente, ao mesmo tempo em que sombreia uma área muito pequena do coletor, além de não apresentar todos os complicadores existentes quando se deseja trabalhar com um tubo evacuado. Assim o tubo

absorvedor é feito com um tubo de cobre e ambos com o mesmo comprimento do coletor, com o objetivo de aumentar a absorvidade da radiação solar, tanto o tubo quanto a calha receberam um revestimento negro.

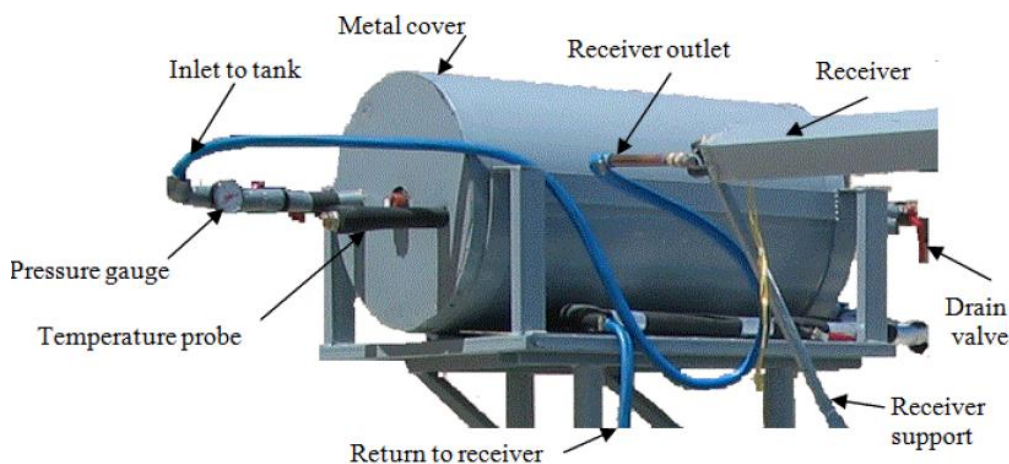
Figura 4.61 - Tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

Uma precaução tomada pelos pesquisadores foi a colocação de um tanque de inércia térmica. Esse tanque é destinado para situações de instabilidade para o sistema de aquecimento, por exemplo, quando passa uma nuvem e sombreia os coletores, fazendo assim com que o mesmo deixe de aquecer o fluido. Nessas situações o tanque de inércia térmica, apresenta-se como um acumulador de calor e não permite que a temperatura do fluido varie muito. O tanque utilizado é de $3,6 \text{ m}^2$ e é mostrado na Figura 4.62.

Figura 4.62 - Tanque de inércia térmica utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

Visando poder utilizar esse sistema longe da rede elétrica e até mesmo mostrar o processo de conversão fotovoltaica a estudantes, foram utilizados dois pequenos painéis fotovoltaicos para o fornecimento ao sistema de controle e ao motor de corrente contínua, utilizado para executar a correção no posicionamento do coletor solar ao longo do dia. Esse sistema de geração de energia elétrica é mostrado na Figura 4.63.

Figura 4.63 - Sistema de fornecimento de energia elétrica para o subsistema de controle do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

Com relação ao sistema de rastreamento solar, foi escolhido o rastreamento com apenas um grau de liberdade, posicionado paralelo ao eixo Norte-Sul.

A partir da determinação do rastreamento em um grau de liberdade, foi utilizado um motor de corrente contínua acoplado a um redutor de velocidade. Além da baixa rotação do motor, foi necessário a utilização do redutor de velocidade devido a precisão necessária na correção do coletor, além do seu deslocamento ser bastante lento. Esse conjunto se conecta ao coletor a partir de um sistema de transmissão por corrente, como mostrado na Figura 4.64.

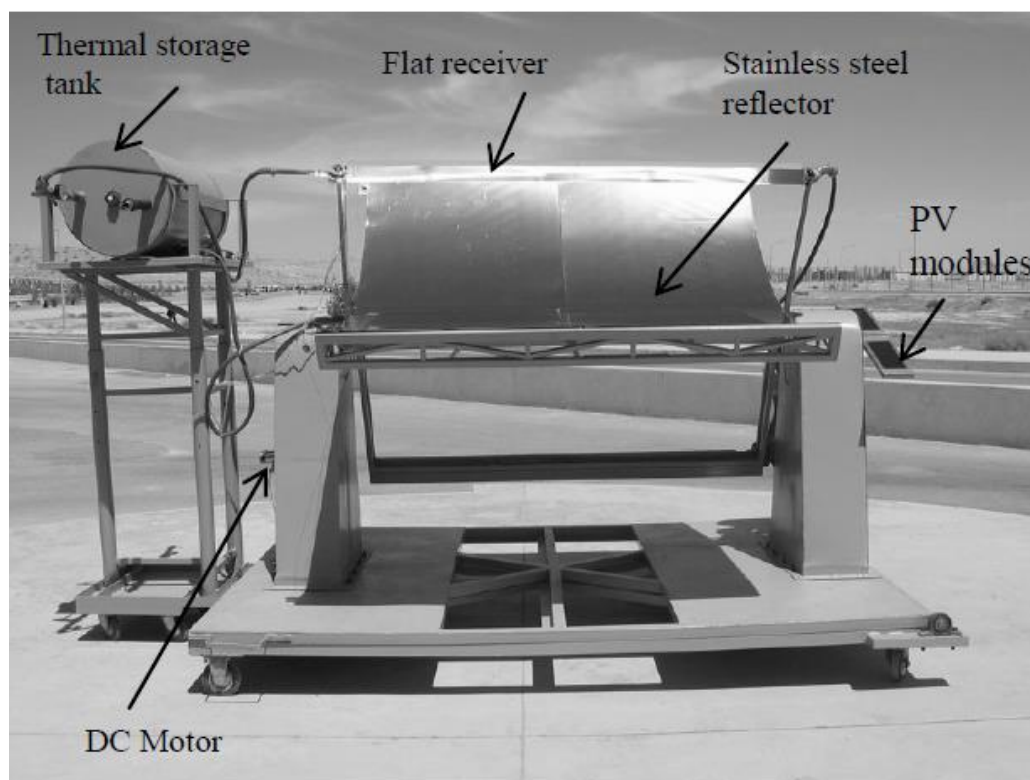
Figura 4.64 - Sistema de correção no posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

O correto posicionamento do coletor, de maneira que a radiação solar esteja sempre perpendicular ao plano da borda do coletor, é feita utilizando dois sensores fotoelétricos nas extremidades do coletor. Assim o correto posicionamento está assegurado quando a tensão nesses dois sensores forem semelhantes (dentro de uma faixa de tolerância). Assim quando há um desequilíbrio nessas tensões, o sistema aciona o motor para que esse entre em ação e corrija o posicionamento do coletor. O sistema montado é mostrado na Figura 4.65.

Figura 4.65 - Bancada de aquecimento solar.



Fonte: Odeh e Abu-mulaweh (2013)

4.1.9 - Parabolic Trough Collector

Nessa Patente o objetivo do inventor era o projeto de um Coletor Cilindro Parabólico que fosse simples de fabricar, transportar e montar no local desejado, mas ao mesmo tempo tivesse as qualidades imprescindíveis para esse tipo de equipamento, tais como boa precisão construtiva (principalmente em seu perfil parabólico), e que apresente alta resistência estrutural, de maneira a permitir o seu funcionamento adequado dentro das faixas de vento médias apresentadas no local de sua instalação, independente do comprimento das linhas de coletores que tenham sido instaladas. Para que essas características sejam alcançadas, é necessária certa rigidez, que permita as deformações permanecerem dentro do intervalo aceitável segundo parâmetros óticos.

Uma das maiores vantagens dessa estrutura é a sua modularidade, permitindo que através de procedimentos padronizados, consiga-se uma grande variedade de comprimentos e por consequência diferentes cargas térmicas cedidas ao sistema de interesse.

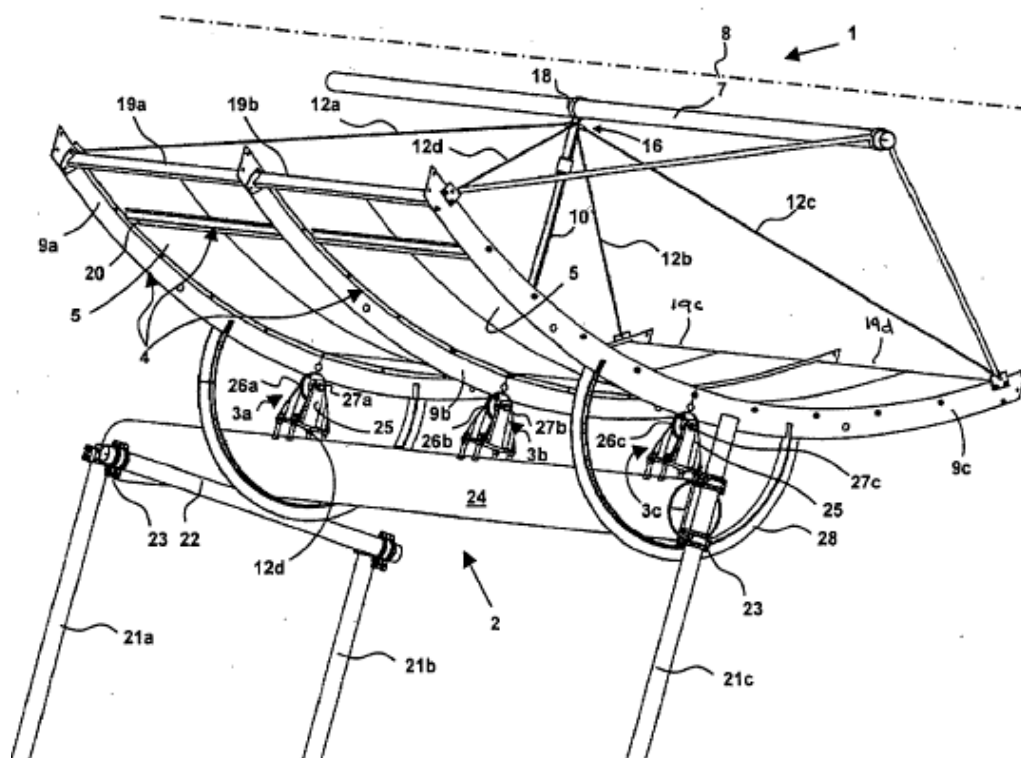
Entretanto o mesmo faz um alerta quanto a fabricação. Esse aconselha a utilização de fabricação especializada, a fim de garantir que as formas e geometrias sejam atendidas dentro

das mais finas tolerâncias possíveis (desde que dentro do orçamento do projeto), uma vez que esse equipamento necessita de precisão ótica. Enfatiza-se aqui a superfície refletora, que tem papel fundamental na eficiência do coletor e que é extremamente sensível a desvios em sua geometria. Além desse cuidado na fabricação, é proeminente o mesmo asseio nas etapas de transporte e montagem, para que se mantenha a precisão necessária.

Devido a todos esses requisitos aparentados acima, é muito recorrente ao inventor fazer menção a necessidade de mão de obra especializada durante todas as etapas do projeto desse coletor solar. Todo esse cuidado deve ser seguido para que ao final do projeto possa ser minimizado o número de não conformidades.

Além da sua modularidade de facilidade de transporte e montagem, outra vantagem da patente é a utilização de um conjunto de amarras que foi utilizada pelo inventor, com o objetivo de conferir uma maior resistência à estrutura, sem que para isso tenha-se que aumentar o peso ou o custo do coletor. Esse sistema de amarras pode ser visto na Figura 4.66.

Figura 4.66 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico que compõe o inventor.

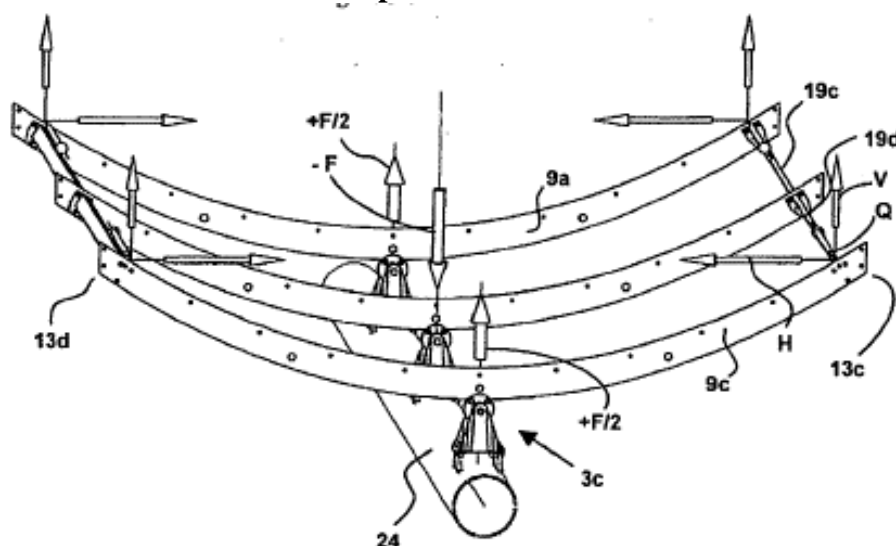


Fonte: Amaton SA (2010)

Essas amarras devem preferencialmente, ser colocadas a cada dois painéis. Caso seja mais espaçado, pode causar fragilidade no coletor e caso tenha mais amarras, aumentará a área sombreada do coletor, causando assim uma redução na eficiência desse sistema de aquecimento.

Na Figura 4.67 é mostrado um diagrama dos esforços gerados pelos cabos pré-tensionados que são conectados a estrutura do coletor. A partir dessas tensões são diminuídas as deformações de torção e flexão causadas pela carga de vento. Essas deformações são extremamente danosas, pois distorcem o perfil parabólico do coletor, assim diminuindo o fator de interceptação, o que causa fuga da radiação refletida, acarretando diminuição na eficiência do coletor.

Figura 4.67 - Carregamentos estáticos atuando na estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Amaton SA (2010)

Vale salientar que ao falar em deformações na estrutura do coletor, não é necessariamente uma análise típica de mecânica dos sólidos, no qual as tensões prejudiciais são superiores a tensão de escoamento do material. Dessa maneira, na estrutura do coletor, não são apenas as deformações permanentes que devem ser utilizadas como critério de projeto, pois mesmo estando dentro da região elástica, podem ocorrer deformações que desfocam o coletor, impedindo que ele conduza a energia térmica até o tubo absorvedor localizado em seu foco.

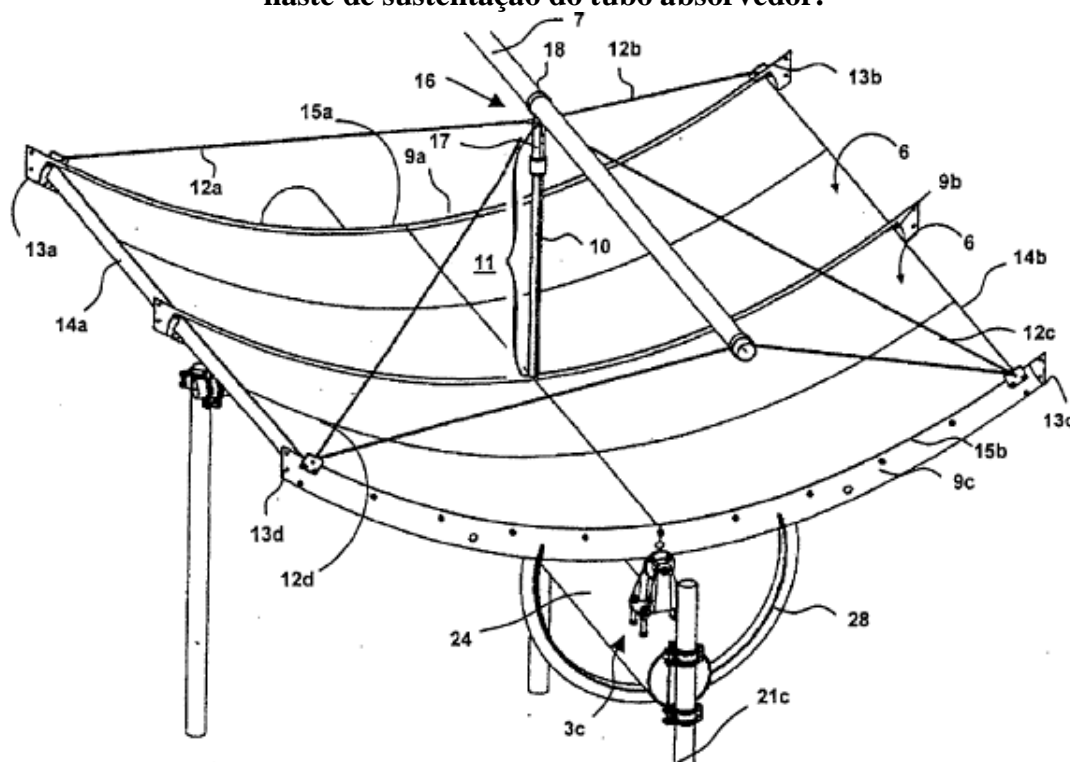
Essa deformação deve ser observada, pois esses coletores geralmente são instalados em locais abertos e que apresentam ventos fortes e com elevada incidência, dessa maneira não é aceitável que em diversos momentos durante a operação, cargas de ventos típicas no local, impeçam o sistema de funcionar corretamente.

Devido ao abordado, o critério de deformação utilizado deve ser de caráter ótico, de forma a responder a pergunta: Qual o nível de tensão que irá gerar uma deformação aceitável, para que não haja tanta perda na eficiência do coletor?

A fim de diminuir o sombreamento sobre o espelho, o inventor colocou uma fina haste como suporte para o tubo absorvedor, como mostrado na Figura 4.68. Como a resistência à flexão dessa haste é baixa, foi colocado um conjunto de amarras (estaços) que aumentam sua resistência.

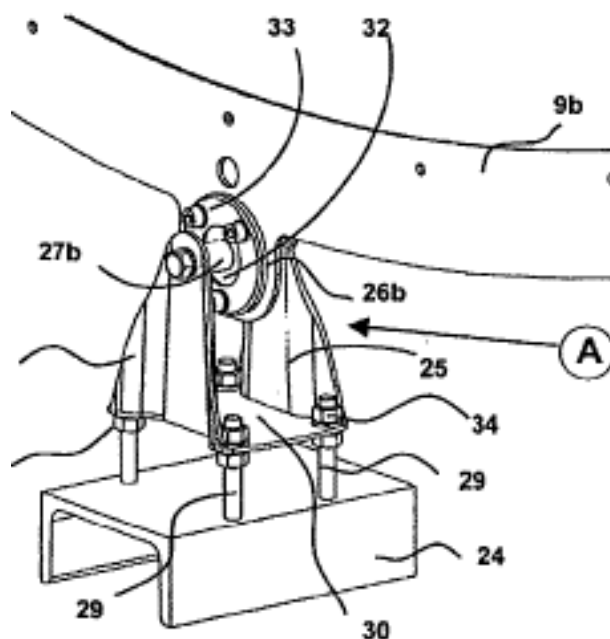
Outro problema recorrente na instalação desse tipo de coletor é o desalinhamento do terreno. Esses desalinhamentos são bastante danosos, pois causam um aumento das perdas de final de linha. Para contornar esse problema, o inventor propôs um ajuste fino no alinhamento horizontal do coletor, como mostrado na Figura 4.69. Esse elemento permite uma certa tolerância ao erro na hora de alinhar a estrutura com a horizontal, sendo possível o ajuste fino após o final dessa operação.

Figura 4.68 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico destacando a haste de sustentação do tubo absorvedor.



Fonte: Amaton SA (2010)

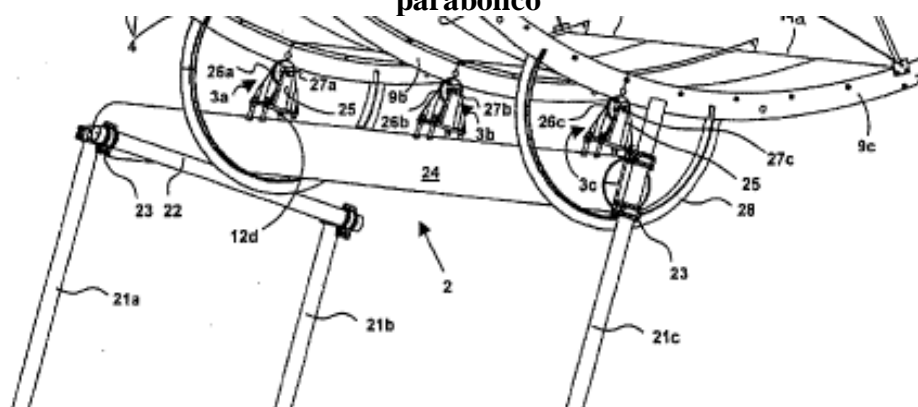
Figura 4.69 - Perspectiva do sistema de alinhamento horizontal do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Amaton SA (2010)

Uma das fontes de esforços torcionais na estrutura é o sistema de rastreamento solar, que corrige o posicionamento do coletor ao longo do dia. A fim de minimizar esse problema, o invento adicionou um elemento de alta rigidez à estrutura, como mostrado na Figura 4.70 (2).

Figura 4.70 - Elemento de alta rigidez adicionado a estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico

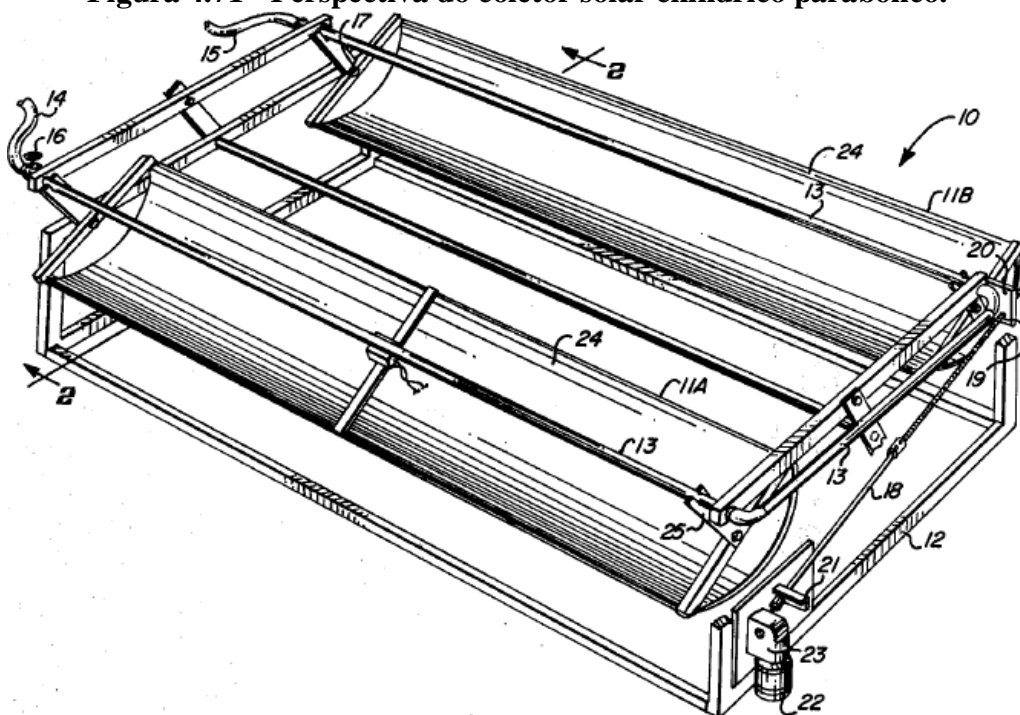


Fonte: Amaton SA (2010)

4.1.10 - Solar Energy Converter

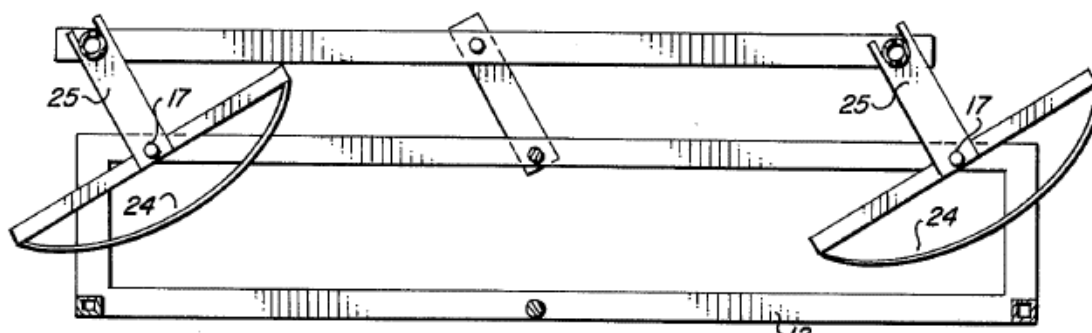
Essa patente é um modelo de aquecedor solar concentrador de baixo custo e adequado a pequenas vazões. O sistema proposto é mostrado na Figura 4.71 e tem como diferencial, entre outras coisas, o seu sistema de rastreamento solar, que permite mover todos os coletores simultaneamente com um único atuador. Esse rastreamento é conseguido através de um mecanismo de acionamento mostrado na Figura 4.72 e que permite aproximadamente 180° de acompanhamento solar.

Figura 4.71 - Perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Willian e Patricia (1977)

Figura 4.72 - Sistema de acionamento simultâneo do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Willian e Patricia (1977)

Mesmo se tratando de um coletor de pequeno porte, a sua utilização é preferível a dos coletores planos convencionais nas situações em que se deseja água em temperaturas em torno de 90°C. Essa eficiência mais elevada é conseguida devido a concentração conseguida a partir desse tipo de coletor, bem como uma menor perda térmica, quando comparamos com o coletor plano.

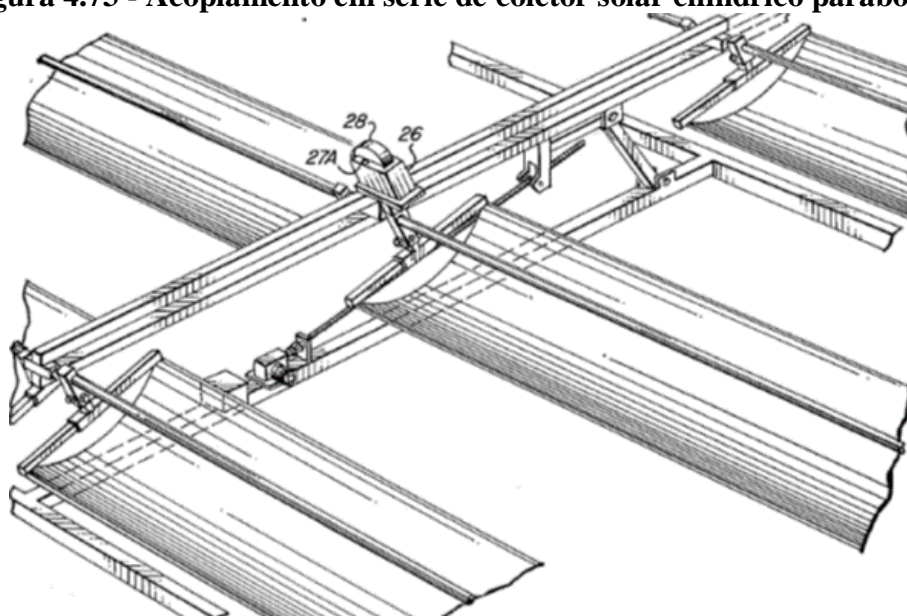
Outra grande vantagem que esse coletor apresenta com relação aos coletores planos, é a minimização das perdas por reflexão. Essas perdas são minimizadas devido a não existência de uma superfície de material transparente recobrindo o coletor.

Como já abordado a transmissibilidade dos materiais é uma propriedade que depende do comprimento de onda da radiação incidente e também depende da direção a qual essa radiação incide. Feita as devidas simplificações, podemos dizer que a transmissividade do vidro é proporcional ao cosseno do ângulo que a radiação faz com a direção azimutal. Dessa maneira, coletores solares que apresentam cobertura de vidro e trabalham estáticos, só produzem em sua capacidade nominal das 10 às 14 horas. No restante do tempo, as perdas por reflexão, impedem da radiação solar entrar no coletor, reduzindo significativamente a sua eficiência, característica que torna os coletores planos menos adequados a trabalhar em altas temperaturas.

Outra novidade acrescentada ao estado da técnica é a utilização de um perfil semicilíndrico como superfície refletora. Embora esse apresente uma menor qualidade no foco, apresenta uma maior facilidade de fabricação, assim barateando ainda mais o coletor.

Por se tratar de uma estrutura modular, maiores cargas térmicas serão conseguidas a partir da utilização de um maior número de coletores. A união de diversos coletores é mostrado na Figura 4.73.

Figura 4.73 - Acoplamento em série de coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Willian e Patricia (1977)

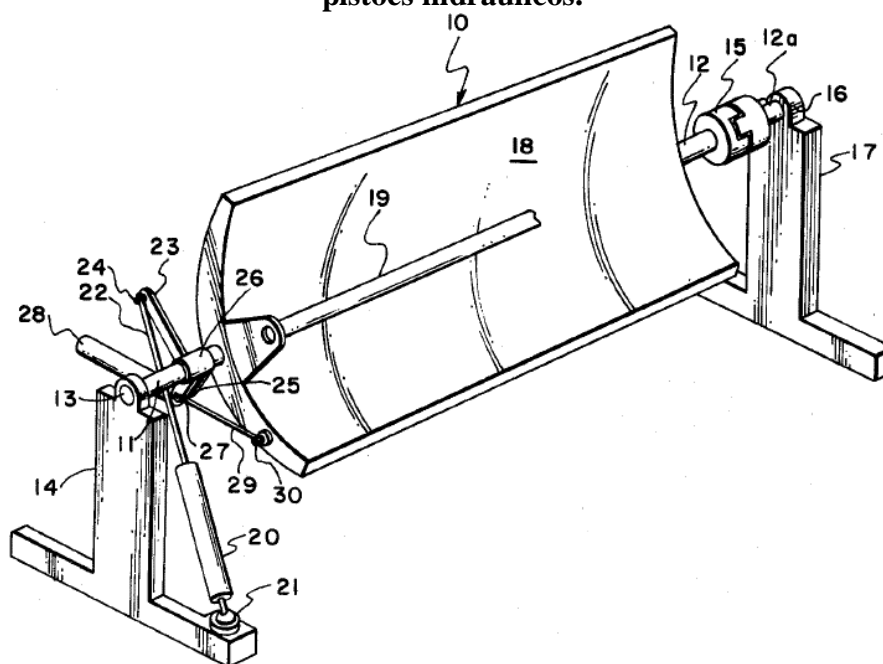
Uma das desvantagens apresentadas por esse coletor é a quantidade de material demandado para a construção da estrutura, mesmo nas áreas que estão vazias. Embora o espaçamento seja necessário devido ao sombreamento que um coletor realiza sobre o outro. Assim uma melhoria poderia ser alcançada, adotando-se vários níveis de coletores com diversas elevações (para evitar o sombreamento), permitindo aumentar a densidade de energia do coletor.

4.1.11 - Solar Collector System

O objetivo do inventor com essa patente é viabilizar a utilização de coletores solares cilindro parabólicos em instalações de pequeno porte. Não houve uma popularização desse tipo de coletor devido à complexidade envolvida em sua fabricação e se deve principalmente à acurácia necessária para obter-se uma forma parabólica que esteja de acordo com padrões óticos aceitáveis. Em face desse problema, o inventor propôs uma nova configuração de coletor de baixo custo que seja acessível para a utilização em pequenas instalações de aquecimento ou refrigeração, mas que apresente a eficiência característica desse tipo de coletor.

Para isso deve-se minimizar as deformações causadas por cargas de vento (principalmente em grandes linhas de coletores) e além disso ele propõe um sistema de rastreamento solar a partir de atuadores lineares como mostrado na Figura 4.74.

Figura 4.74 - Vista em perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico acionado por pistões hidráulicos.



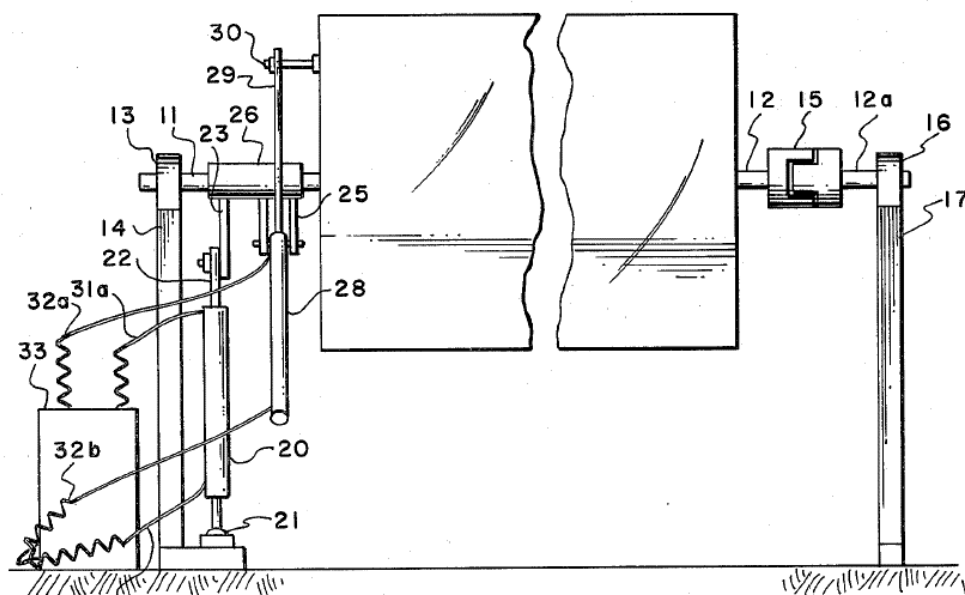
Fonte: Solar Kinetics Inc.(1977)

A utilização desse pistão se deve ao menor custo em comparação com os sistemas de rastreamento convencionais que utilizam motores e redutores de engrenagens, sem que para isso perca-se em acurácia de posicionamento. Além disso, o sistema de rastreamento que utiliza o pistão, apresenta manutenção mais barata e menos frequente, aumentando assim a competitividade desse sistema frente aos sistemas comerciais.

Uma vez que a energia solar encontra-se diluída, é necessária uma grande área de coleta, por isso as instalações de aquecimento são bastante longas. Desta forma, é preciso vários coletores em série e em paralelo para que se atinja a temperatura e a vazão para o processo desejado. Ciente dessa condição, a disposição dos coletores deve ser feita com critérios, para evitar as deformações devido cargas de vento.

Para evitar essas deformações é necessário que a estrutura de sustentação dos coletores, mostrada na Figura 4.75, apresente um afastamento adequado. Assim, a fim de aumentar a resistência da estrutura, pode-se aproximar as colunas de sustentação do coletor, o que tem por consequência a diminuição das “células” que compõem todo o sistema de aquecimento.

Figura 4.75 - Estrutura de sustentação do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Solar Kinetics Inc.(1977)

Como já mencionado, os sistemas de rastreamentos convencionais, que utilizam sistemas de engrenagens, apresentam altos custos e elevadas manutenções. Por esse motivo o inventor propõe um sistema composto por dois pistões hidráulicos, como mostrado na Figura 4.76. A utilização de dois pistões hidráulicos é necessário devido a impossibilidade de conseguir 180° de giro, utilizando apenas um atuador linear, logo o inventor propõe o sistema apresentado.

Ve-se na Figura 4.77 os pontos extremos no posicionamento do sistema de rastreamento. Esses pontos serão atingidos nas primeiras e nas últimas horas de Sol.

Figura 4.76 - Atuadores do sistema de rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico.

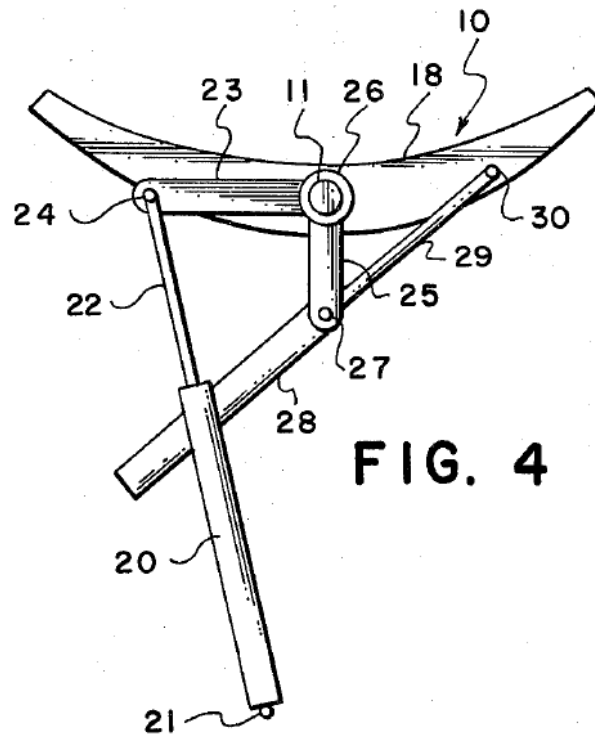


FIG. 4

Fonte: Solar Kinetics Inc.(1977)

Figura 4.77 - Pontos extremos de posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.

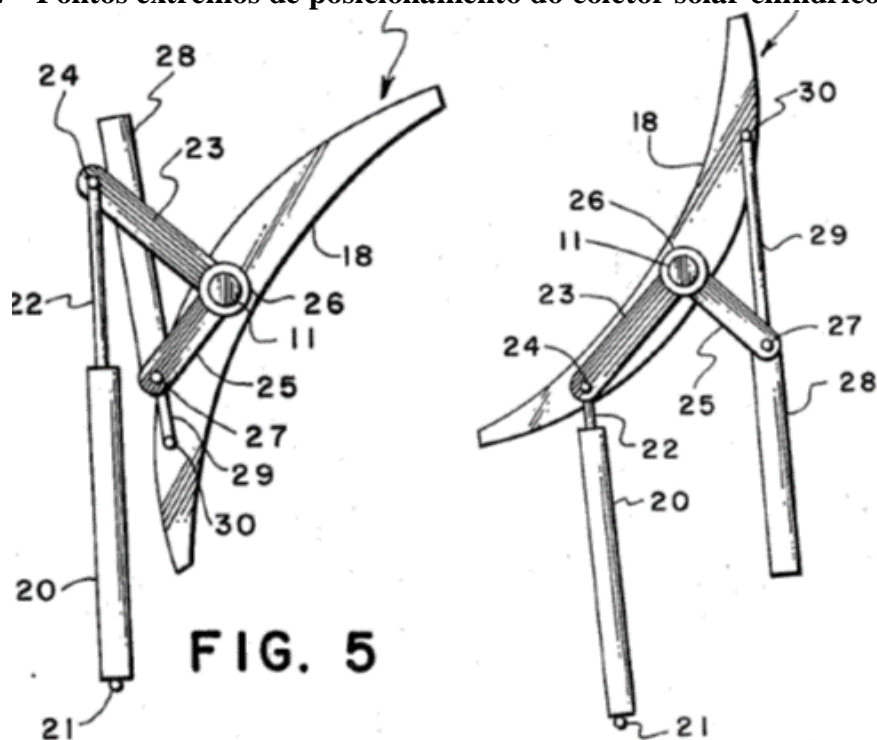


FIG. 5

Fonte: Solar Kinetics Inc.(1977)

4.1.12 - Solar Reflection Apparatus

Como discutido na patente anterior, um dos sistemas que exige maior atenção e por consequência acarreta maior custo, é o sistema de rastreamento solar. Esse problema é recorrente por que a maioria dos Coletores Solares Cilindro Parabólicos apresentam estruturas desbalanceadas com relação ao seu eixo de rotação, como é mostrado na Figura 4.78.

Dado esse desbalanceamento, o sistema de rastreamento sempre trabalha em condições de elevado esforço, sendo essa a principal causa para as constantes manutenções demandadas pelos sistemas atuais. Inconveniente que aumenta os custos variáveis desse tipo de coletor e que por muitas vezes inibe a instalação desse sistema devido ao elevado tempo de retorno do investimento.

Figura 4.78 - Desbalanceamento na distribuição de massa com relação ao eixo de rotação de um coletor solar cilíndrico parabólico.



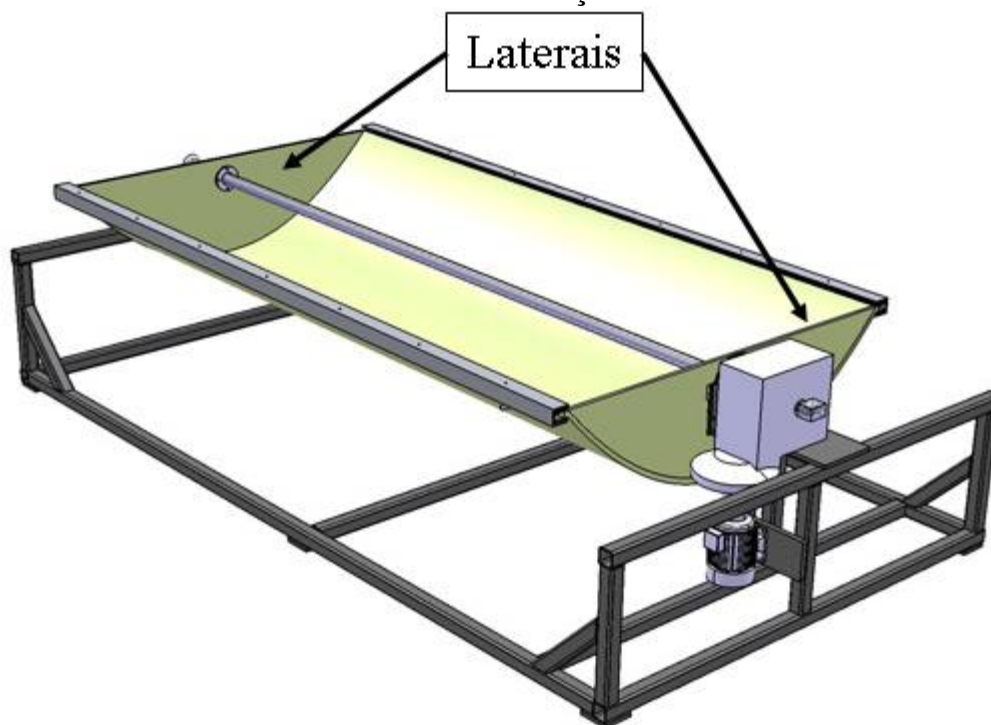
Fonte: http://www.cmu.edu/iwess/components/solar_thermal_system/Equipment/ acesso em:

19/08/2015

Além desses problemas, o desbalanceamento também aumenta as deformações sofridas pela estrutura, levando assim a necessidade de aumento da rigidez estrutural, fator que eleva o preço desse tipo de coletor e diminui a competitividade desse sistema.

De acordo com o inventor, uma das maneiras de minimizar esse problema é eliminando o desbalanceamento da estrutura. Essa eliminação pode ser atingida de duas maneiras. Uma delas é mostrada na Figura 4.79. Contudo o fato de apresentar essas laterais preenchidas eleva-se o preço do coletor devido ao aumento do consumo de matéria prima e pela introdução desse peso que exigirá mais do sistema de rastreamento, além de aumentar as perdas de final de linha.

Figura 4.79 - coletor solar cilíndrico parabólico com o centro massa coincidente com o centro de rotação.



Fonte: <http://www.psa.es/webeng/areas/ussc/grupomedia/fasol.php> acesso, Acesso em 22/07/2015

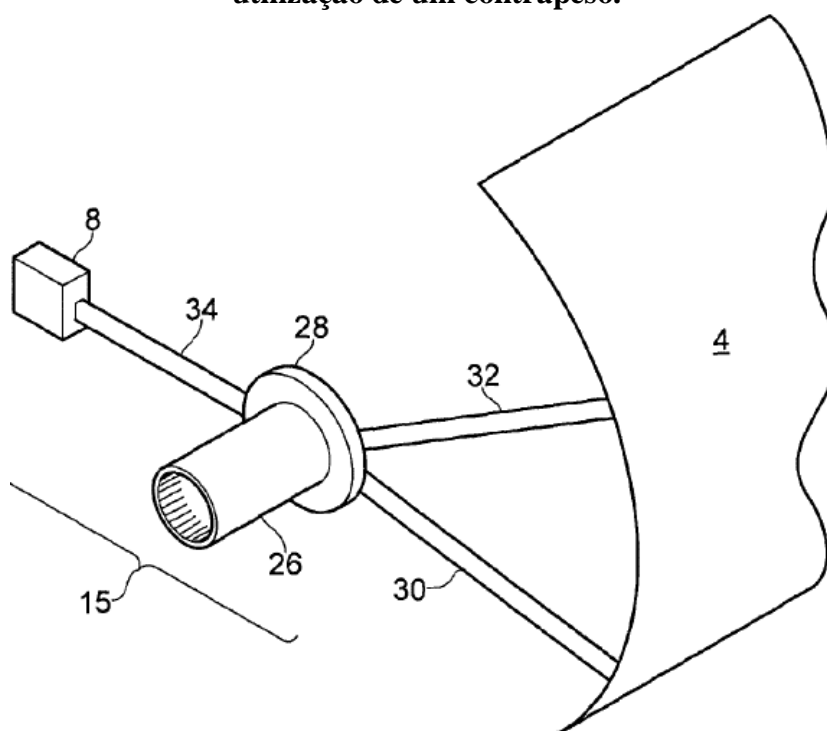
Uma outra maneira de corrigir o problema do desbalanceamento é a apresentada pelo inventor dessa patente, mostrado na Figura 4.80, onde um contrapeso equilibra o coletor fazendo com que o seu centro de massa coincida com o seu centro de rotação.

Essa solução se apresenta com um preço bem menor, por trazer uma menor complexidade de fabricação e demanda uma menor quantidade de matéria-prima. Além de

poder ser instalada em sistemas que já se encontram em operação, a um custo de instalação bem reduzido.

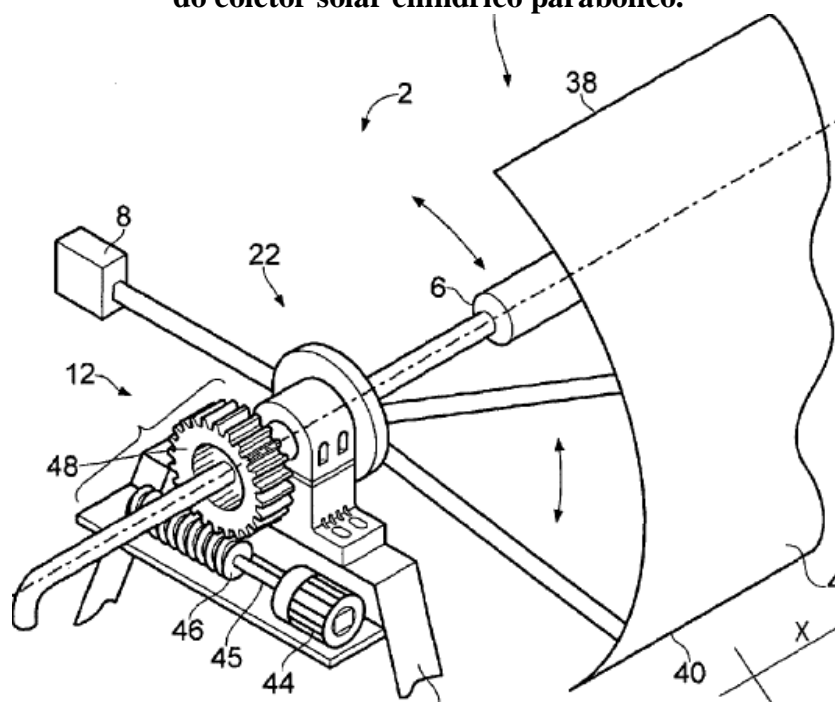
A utilização dessa solução viabiliza inclusive a utilização do sistema de rastreamento movido por engrenagens, como mostrado na Figura 4.81, pois o desgaste será drasticamente reduzido em comparação com os atuais sistemas em funcionamento.

Figura 4.80 - Perspectiva do coletor solar cilíndrico parabólico balanceado pela utilização de um contrapeso.



Fonte: Dow Corning Corporation (2013)

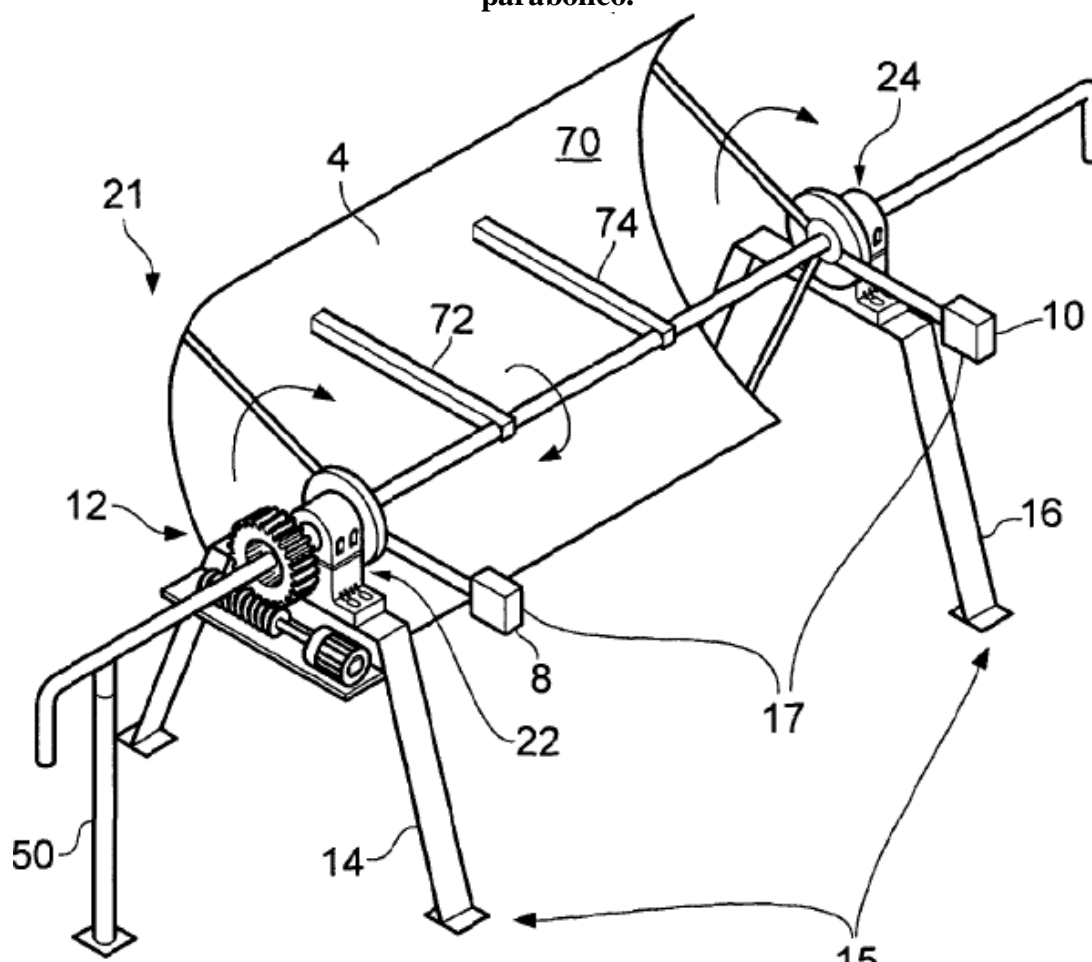
Figura 4.81 - Sistema de acionamento do tipo coroa e sem-fim para o rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Dow Corning Corporation (2013)

Um dos pontos negativos do uso do contra peso, é o fato de que se não forem dimensionadas corretamente, podem causar deformações indesejáveis na estrutura. Outro ponto negativo é a necessidade de utilização de “células” menores, uma vez que cada uma delas agora apresenta uma maior massa. Essa célula está mostrada na Figura 4.82. Essa redução no tamanho da “célula” deve-se ao aumento na massa, inerente a colocação do contra peso, que se não fosse realizada levaria a um aumento excessivo na deformação de flexão do coletor, assim prejudicando as suas propriedades óticas.

Figura 4.82 - Célula do sistema de aquecimento utilizando o coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Dow Corning Corporation (2013)

4.1.13 - Levantamento dos Requisitos

Esses foram os equipamentos estudados para o projeto e fabricação do coletor utilizado nesse mestrado. Foi utilizado apenas a pesquisa acadêmica e técnica devido à falta de normas ou de manuais de melhores práticas que guiasse o projeto ou até mesmo que fornecesse os requisitos mínimos para um coletor solar cilíndrico parabólico.

A partir desse estudo foram determinados os principais subsistemas, bem como os seus principais requisitos:

- **Estrutura de sustentação;**
 - Perfil Parabólico;
 - Alta resistência à deformação (cargas de vento);

- **Superfície refletora;**
 - Abertura do Coletor;
 - Ângulo de borda;
 - Alta refletividade;
- **Tubo absorvedor;**
 - Diâmetro do absorvedor;
 - Cobertura material transparente;
 - “gap” entre tubos;
 - Absortividade da superfície do absorvedor;
- **Sistema de rastreamento.**
 - Eixo de rastreamento;
 - Controle.

Também foi gerada uma lista de requisitos para o projeto. Contudo a empresa Suna Engenharia se resguarda do direito de não divulgá-la por considerar essa, informação estratégica da empresa.

Finalizando a etapa de Projeto Informacional do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico, iniciou-se início a etapa de Projeto Conceitual, onde serão analisadas todas as informações estudadas de maneira a propor princípios de solução, que permitam satisfazer todos os requisitos e especificações gerados a partir dessa fase do projeto.

4.2 Projeto Conceitual de um coletor solar cilíndrico parabólico

Após a finalização do Projeto Informacional, foi iniciado o desenvolvimento da concepção do coletor solar cilíndrico parabólico. Nessa etapa serão analisadas os diversos princípios de solução de maneira a atender o maior número de requisitos para o sistema.

Após o estudo realizado chega-se à conclusão que o presente coletor consiste de uma superfície refletora em forma de calha parabólica, cuja função é refletir e concentrar toda a energia solar (componente direta) que incide perpendicularmente ao plano da borda, um tubo

absorvedor e tem por objetivo absorver essa radiação que é concentrado em sua superfície. Dentro do tubo, escoar um fluido que irá receber esse calor absorvido por meio de condução térmica e transportará esse calor para ser utilizado no processo que se deseja. Há ainda um sistema de rastreamento que tem como função corrigir o posicionamento do coletor de maneira que a radiação direta incida perpendicularmente ao plano de borda.

Como mostrado no parágrafo anterior e como mostrado no estado da arte, o coletor pode ser dividido nos seguintes subsistemas:

- Superfície Refletora;
- Tubo absorvedor;
- Sistema de rastreamento solar.
- Estrutura

Em face dessa divisão, serão propostas soluções para todos os subsistemas apresentados. Essas soluções deverão ser embasadas em todo o conhecimento e expertise adquiridos até aqui com a análise de todos os equipamentos apresentados.

4.2.1 Superfície refletora

Esse subsistema tem como principal função a de refletir toda a radiação que incide sobre ele para uma mesma linha focal, onde deverá ser colocado um tubo absorvedor para aproveitar essa energia disponível.

Com relação a esses subsistemas, as principais considerações que devem ser feitas são com relação ao tipo de perfil e tipo da superfície refletora.

4.2.1.1 Perfil a ser utilizado

O perfil deve apresentar a propriedade ótica que lhe confira concentrar toda a radiação que incide perpendicularmente ao seu plano de abertura. Diversas geometrias permitem essa convergência da luz solar para uma mesma região do espaço, é o caso, por exemplo, do perfil parabólico e do semicircular.

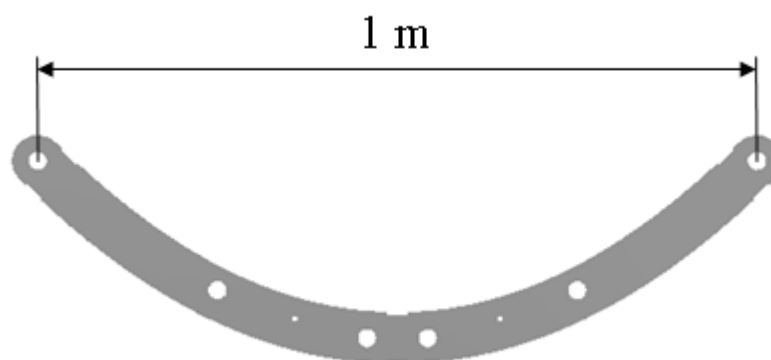
Ao se analisar todos os perfis estudados, a grande maioria utiliza o perfil parabólico para superfície refletora, com exceção da patente US 4,00,734 (Willian e Patricia, 1977). A utilização do perfil parabólico garante uma melhor qualidade do foco gerado, conferindo assim

duas grandes vantagens. A primeira é proporcionar um melhor fator de interceptação para o coletor, aumentando assim a sua eficiência, a segunda grande vantagem é a de permitir a utilização de maiores fatores de concentração, assim atingindo maiores temperaturas na saída do sistema de aquecimento.

Contudo, há desvantagens em se utilizar o perfil parabólico. A principal delas é a dificuldade da obtenção do perfil e mesmo quando se obtêm esse perfil um outro problema passa a ser a precisão com que foi fabricado.

A partir da análise de todas essas variáveis, mesmo com a dificuldade de obtenção da geometria, optou-se pela utilização do perfil parabólico, devendo-se procurar soluções para a fabricação de tal perfil. O perfil utilizado nesse trabalho segue a equação $y = x^2$ e é mostrado na Figura 4.83.

Figura 4.83- Concepção do perfil utilizado na superfície refletora do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

4.2.1.2 Superfície de Reflexão

A superfície de reflexão é a responsável pelo desviar da luz para o local onde será colocado o tubo absorvedor. Essa superfície deve apresentar características óticas e geométricas.

As características óticas são satisfeitas a partir de uma superfície plana e lisa, que apresenta uma alta refletividade a luz solar, principalmente nos comprimentos do visível, pois nessa faixa é onde se concentra 50% da energia térmica presente na radiação solar.



Já as características geométricas são conseguidas por superfícies pré-moldadas para aquela aplicação, ou através de chapas finas maleáveis, que quando pressionadas sobre a estrutura, com perfil parabólico, adquiram esse formato.



Dentre essas soluções, a utilização de perfis pré-moldados está restrita a grandes centrais de geração de energia elétrica, uma vez que apresentam altos custos de fabricação, exigindo muitas vezes uma linha de produção dedicada para aquele produto. Por esse motivo só foram estudados superfícies de reflexão que sejam feitas a partir de chapas finas.

A fim de determinar a melhor solução para os diversos subsistemas, a partir desse ponto, utilizou-se uma abordagem de dispor todas as soluções estudadas até o momento e a partir de uma visão global de todas as soluções, propor a que será utilizada nessa dissertação, seja pela escolha da melhor ou pela proposição de uma outra que guarde mais características vantajosas que todas as outras individualmente.

A Tabela 4.5 mostra as principais soluções apresentadas durante os estudos do Projeto Informacional.

Tabela 4.5 - Princípios de solução estudados para a superfície de reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Solução
Pigozzo Filho (2013)	
Ho e Ito (2007)	

Souza Filho (2008)	
Kumar, Srinath e Reddy (2013)	

Para a confecção dessa superfície de reflexão, Pigozzo Filho (2013) utilizou-se uma chapa fina e plana, recoberta com um filme refletivo para lhe conferiu alta refletividade a luz, principalmente na faixa do visível, uma vez que quase 50% da energia térmica da radiação solar se encontra nesse comprimento de onda. Esse filme promete uma refletividade de 0,92 e uma durabilidade de 10 anos, tornando assim uma alternativa muito boa para a confecção as superfície refletora. Além dessa vantagem, o mesmo ainda apresenta uma aplicação rápida, uma vez que esse vem em forma de adesivo para ser fixado sobre outra geometria. O principal ponto negativo dessa solução é a falta de um representante no Brasil, obrigando a quem deseje adquirir essa película, o trabalho de importá-la.

Já Ho e Ito (2007) optaram por uma solução alternativa. Para conseguirem a superfície de reflexão, eles decidiram utilizar papel alumínio fixado sobre papel cartão. Essa solução tem um custo extremamente baixo, contudo apresentou muitas dificuldades na hora da deposição do alumínio. Essas dificuldades se devem a fina espessura da folha de alumínio, que facilmente adquiria dobras e enrugamento, e que mesmo com muito empenho não se conseguiu eliminar todos os defeitos na hora da deposição.

Souza Filho (2008) optou pela utilização de finas lâminas de vidro depositada sobre um perfil parabólico predeterminado. Sua abordagem foi a de aproximar o perfil parabólico por finos segmentos de reta, abordagem está amplamente utilizada por matemáticos que dizem que para pequenas variações uma função pode ser aproximada por sua derivada. Essa solução apresenta um baixo custo, devido a facilidade de se encontrar vidro e a facilidade de cortá-lo em finas lâminas. Contudo o trabalho de fixar lâmina por lâmina, sobre a estrutura da superfície

refletora, é bastante demorada além de envolver o trabalho com vidro, o que eleva bastante o rigor com o qual essa fabricação deve ser conduzida.

Já Kumar, Srinath e Reddy (2013) optaram por uma fina chapa de alumínio polido pressionado contra a estrutura da superfície refletora. Embora apresente uma refletividade menor que a conseguida com o filme refletivo, apresentava-se maior que as outras duas soluções apresentadas. Além da alta refletividade, ela traz facilidades no manejo (uma vez que não é tão frágil quanto o vidro) e maior facilidade de fixação. Além das facilidades de ser uma peça única (não finas lâminas) e quando deformada não apresentam imperfeições como as do papel alumínio. Como desvantagem, tem-se o preço da folha que é de certa forma elevado, sendo mais barata apenas que o filme refletivo.

Devido ao abordado nesse tópico o princípio de solução adotada foi a folha de alumínio, devido a facilidade de manuseio e a boa refletividade apresentada por esse material. Uma imagem dessa superfície será mostrada ao final do Projeto Conceitual.

4.2.2 Tubo absorvedor

O tubo absorvedor é o subsistema mais importante para o bom desempenho desse sistema de aquecimento. Estima-se que ele seja responsável por 40% da eficiência do coletor. Toda essa importância está ligada a diversas quantidades de perdas que podem ser induzidas nessa parte do coletor, as principais perdas são as por reflexão e perdas térmicas.

Com o conhecimento dessas fontes de perdas, o tubo absorvedor deve ser projetado para funcionar como uma armadilha para a radiação, de maneira que uma vez que a radiação incida sobre ele, apenas uma pequena parcela possa escapar (perdas) para o ambiente.

O tubo absorvedor, geralmente, é formado por três componentes. Um tubo interno, geralmente de material metálico, um tubo concêntrico e externo ao tubo metálico, fabricado com um material transparente a radiação solar e conexões que tem por objetivo manter esses dois tubos concêntricos e fixados a estrutura do coletor.

Cada um desses componentes tem as suas funções específicas e que geralmente são conflitantes entre si. Assim será usada a abordagem de comparação e escolha, utilizada no subsistema anterior, para a escolha do princípio de solução a ser utilizado por cada um dos componentes do tubo absorvedor.

4.2.2.1 Tubo interno

Esse componente é distinto dos demais devido à alta absortividade e baixa emissividade apresentada por sua superfície.


Duas variáveis passam pela definição do conceito desse componente. A primeira diz respeito ao tipo material do qual é fabricado o tubo e o segundo com relação ao tipo de superfície absorvedora adotada.

Com relação à primeira, todos foram unânimes na escolha de materiais metálicos para a fabricação desse tubo. Essa escolha foi motivada pela excelente resistência a temperatura e elevada condutividade térmica apresentada por esses materiais e indispensáveis para o tubo interno. Assim optou-se também pela utilização de materiais metálicos na construção do tubo absorvedor.

Com relação a superfície absorvedora tem-se as situações apresentadas na Tabela 4.6.

Pigozzo Filho (2013) utilizou um tubo com superfície seletiva, obtida a partir de um processo de deposição a plasma, chamado Sputtering. O tubo metálico passa a apresentar excelentes propriedades de absortividade e emissividade. Contudo, esse tubo é bastante caro e não se consegue representantes de nenhuma empresa que o comercialize no Brasil, sendo necessária a importação do mesmo.

Tabela 4.6 - Princípios de solução para a superfície do tubo interno do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Solução
Pigozzo Filho (2013)	

Kempfer (2011)	
Mattos (2011)	

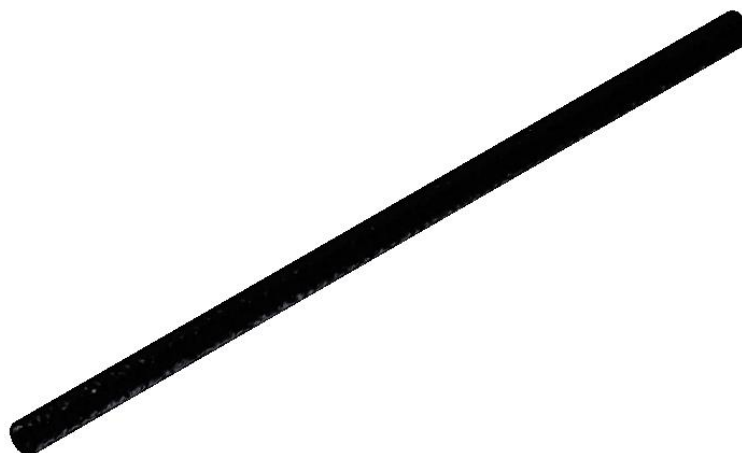
Já Kempfer (2011), mesmo ciente das vantagens da utilização de uma superfície seletiva recobrindo o tubo interno, utilizou um tubo de cobre pintado com tinta preta fosca. A utilização do tubo de cobre deve-se a sua elevada condutibilidade térmica, propriedade que melhora a transferência de calor do tubo para o fluido em seu interior. Já a utilização da tinta preta fosca tem por objetivo, melhorar a absortividade da radiação solar. A principal desvantagem é o fato da aplicação da tinta preta aumentar não somente a absortividade, mas a emissividade da superfície, assim causando um aumento das perdas térmicas do sistema.

Tem-se também o caso de Mattos (2011), que optou por não utilizar nenhum tipo de superfície absorvedora de radiação. Tendo utilizado apenas um tubo de cobre por onde circula água. Essa abordagem traz resultados bastante ruins, limitando bastante a saída a temperatura alcançada pelo coletor. Esses resultados são apresentados na dissertação de Mattos (2011) e podem ser atribuídos em grande parte a ausência de uma superfície absorvedora.

A partir do que foi apresentado, optou-se nesse trabalho pela utilização de um material metálico de alta condutividade térmica, recoberto com material que tenha o objetivo de

aumentar a sua absorvidade no tocante a luz solar. O conceito do tubo absorvedor utilizado nesse trabalho está representado na Figura 4.84.

Figura 4.84 - Concepção do tubo interno do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria Própria

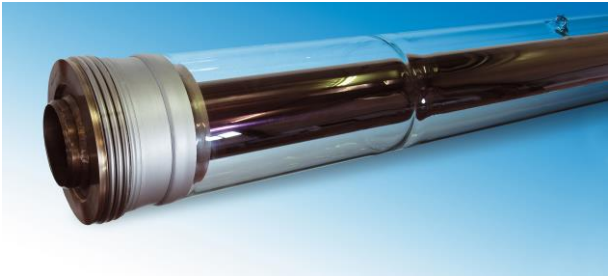
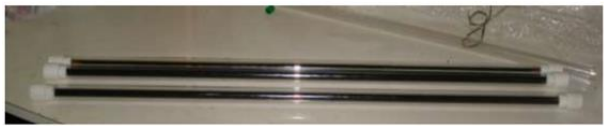
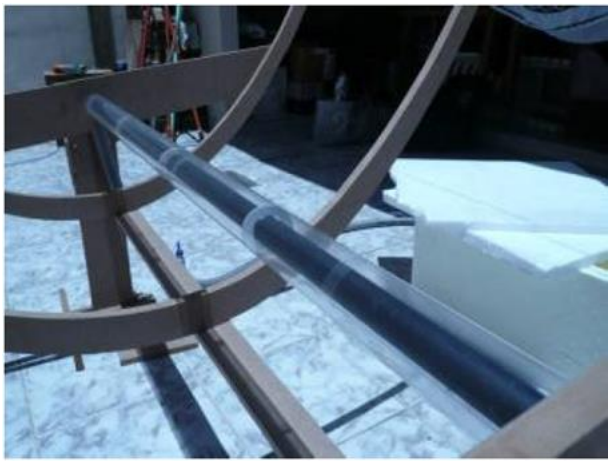

4.2.2.2 Tubo transparente

Esse tubo apresenta um diâmetro interno maior do que o diâmetro externo do tubo interno e geralmente é posicionado concentricamente a esse outro tubo. Sua função é permitir a passagem da radiação solar e minimizar as perdas por condução e convecção no tubo absorvedor.

De acordo com o que foi exposto, esse tubo deve apresentar duas propriedades, a alta transmissividade e uma baixa refletividade. A primeira implica no fato de a luz solar atravessar facilmente o tubo, sem que tenha parte de sua energia drenada para o aquecimento desse tubo. Já a segunda implica que grande parte da radiação que chega até a superfície transparente, irá atravessá-la e não ser refletida de volta para o ambiente, onde se encontra o coletor.

Conforme apresentado no parágrafo anterior, passa-se a analisar os princípios de solução abordados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Princípios de solução do tubo transparente do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Solução
Pigozzo Filho (2013)	
Kempfer (2011)	
Ho e Ito (2007)	
Matrai (2008)	

O princípio de solução escolhido por Pigozzo Filho (2013), utiliza um tubo transparente fabricado com vidro borossilicato de alta transmissividade. Além dessa transmissividade, esse tubo ainda é submetido a um tratamento antirreflexo que diminui bastante a reflexão da luz incidente. Dessa maneira ele consegue praticamente transparente a radiação solar. O principal

ponto negativo dessa solução é o alto custo do tubo de vidro borossilicato e o fato de só ser comercializado em quantidade.

A solução proposta por Kempfer (2011) se apresenta bem mais acessível do que a anterior. Como o seu tubo transparente, ele utilizou tubos de vidro comuns (vidro com alto teor de ferro) colocados concêntricamente ao tubo interno. Embora não apresentem propriedades de transmissividade e refletividade tão boas quanto o borossilicato, esses tubos são mais baratos e facilmente encontrados no comércio local, além de serem altamente resistentes a longos períodos submetidos à radiação solar.

Similar ao apresentado no parágrafo anterior, o princípio mostrado por Ho e Ito (2007) também utiliza um tubo transparente concêntrico ao tubo interno. Contudo para confeccionar esse tubo ele utilizou folhas transparentes (antigamente utilizadas em retroprojetores) fixadas sobre anéis que foram anteriormente fixados sobre o tubo interno. Essa solução não se mostra viável por dois motivos. O primeiro deles é o autor utilizar folhas de papel transparente sem ter informações com relação à sua refletividade e transmissividade, e por último pode-se citar a escolha de um material polimérico como tubo transparente, pois esse material certamente sofrerá uma degradação acelerada devido à alta concentração de radiação ultravioleta que incide sobre ela. Fenômeno que levará a necessidade de várias trocas do tubo transparente durante a vida útil do coletor.

Por último é analisado a solução proposta por Matrai (2008), em que não é utilizado o tubo transparente. O autor optou pela não utilização do tubo transparente por dois motivos. O primeiro deles é a facilidade construtiva trazida principalmente por não ser necessário trabalhar com peças de vidro. Em segundo lugar, o autor alega que deseja-se obter água a baixa temperatura ($55 - 75^{\circ}\text{C}$), não havendo assim elevados gradientes de temperatura que gerem grandes perdas de calor para o ambiente. A principal desvantagem enfrentada por essa solução é a limitação de sempre ter de trabalhar em baixas temperaturas ($\sim 60^{\circ}\text{C}$), onde seria bem mais adequada (devido menores custos) a utilização de coletores planos.

Contudo, após análises de todos esses coletores, não foi mostrada nenhuma análise de natureza econômica ou técnica que embase a escolha ou não da utilização de tubo transparente sobre o tubo interno. Foi decidida então a utilização do critério técnico, perda de calor, como parâmetro para a utilização ou não utilização do tubo transparente no tubo absorvedor.

Como já mencionado, o principal objetivo da utilização do tubo transparente é minimizar as perdas de calor por convecção e condução para o ambiente. Como condição simplificadora, adotar-se-á que a perda por condução é pequena em relação às perdas por radiação e por convecção. Essa consideração é perfeitamente aceitável, uma vez que o espaço

anular entre o tubo interno e externo é preenchido por ar e esse apresenta uma condutividade térmica extremamente baixo (0,03 W/m.K) (Incropera 2011).

Considerando apenas as perdas por convecção e radiação, utiliza-se a equação:

$$Q_{perdido} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad 4.5$$

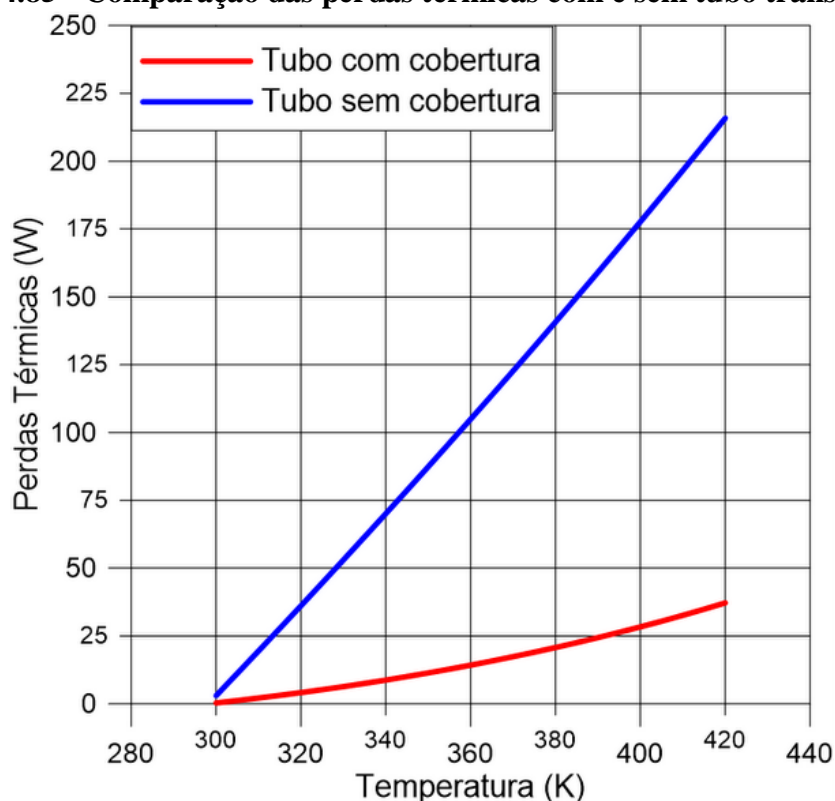
$$Q_{perdido} = \bar{h}A(T_{abs} - T_{\infty}) + \varepsilon A\sigma(T_{abs}^4 - T_{viz}^4) \quad 4.6$$

Onde, para um escoamento externo sobre um tubo, tem-se:

$$\bar{h} = \overline{Nu_D}(k/D) \quad 4.7$$

Assim, para um tubo absorvedor sem tubo transparente, são consideradas tanto a parcela da perda por convecção quanto as perdas por radiação, presentes na equação 4.6. Já para um tubo absorvedor que apresente tubo transparente pode-se desconsiderar as perdas por convecção nessa mesma equação. Resolvendo a equação e mostrando ela graficamente obtêm-se a Figura 4.85.

Figura 4.85 - Comparação das perdas térmicas com e sem tubo transparente



Fonte: Autoria própria

A partir do gráfico apresentado na Figura 4.85, é possível observar que na temperatura de trabalho ($\sim 90^{\circ}\text{C}$) as perdas térmicas sem o uso do tubo transparente é mais de cinco vezes superior a apresentada por um tubo que apresenta a cobertura desse tubo externo. Por esse motivo é decidido que o tubo absorvedor projetado nessa dissertação terá como componente um tubo transparente.

Uma vez decido utilizar o tubo transparente, falta determinar qual princípio de solução será utilizado para esse tubo. Baseando-se nas informações contidas na Tabela 4.7, a solução mais adequada é a utilizada por Kempfer (2011) e nessa dissertação será utilizado um tubo transparente similar ao utilizado em seu trabalho.

O conceito do tubo transparente utilizado nesse trabalho é mostrado na Figura 4.86.

Figura 4.86 - Conceito do tubo transparente do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

4.2.2.3 Conexões do tubo absorvedor

Como já mencionado, essas conexões tem como principais funções a de manter o posicionamento relativo entre o tubo interno e o tubo transparente, além de permitir a conexão do Tubo Absorvedor na Estrutura do coletor.

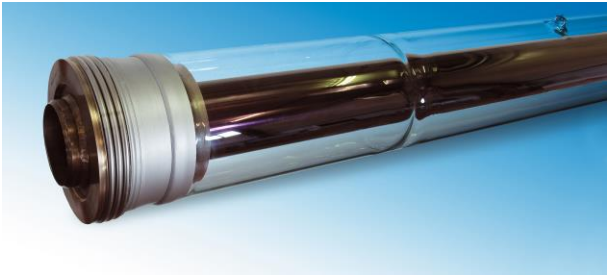

Três requisitos que essas conexões devem satisfazer são: apresentarem elevada resistência degradação devido à radiação solar, não permitirem a perda de calor do fluido de trabalho para o ambiente e permitir movimentação do tubo interno com relação ao tubo transparente.

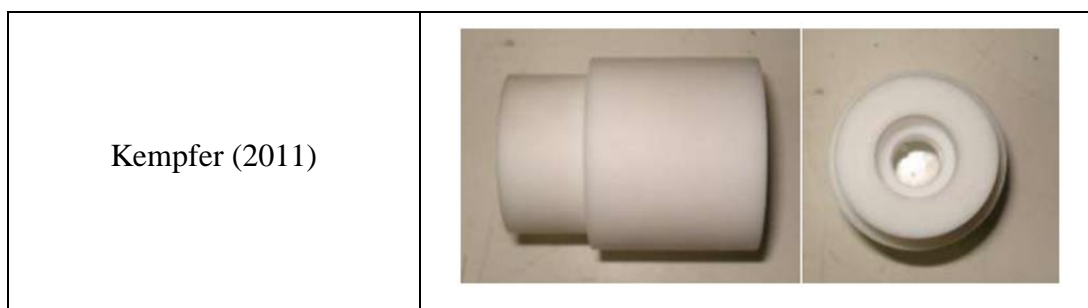
Dentre os requisitos mencionados anteriormente, dois são conflitantes entre si, são esses a elevada resistência à radiação solar e a baixa condutividade térmica. Geralmente esse segundo requisito é apresentado por materiais poliméricos, ao passo que os polímeros não apresentam boa resistência à radiação solar, salvo raras exceções. E caso acrescentemos a variável custo a essa equação, essa se torna praticamente insolúvel. Assim deve-se chegar a um meio termo com relação a essas características conflitantes.

Com relação a movimentação relativa que deve existir entre os dois tubos, essa pode ser resolvida a partir de uma boa escolha dos acoplamentos de cada um desses tubos.

Alguns princípios de soluções para as conexões do tubo absorvedor são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Princípios de solução das conexões do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Soluções
Pigozzo Filho (2013)	
Matrai (2008)	



A solução apresentada por Pigozzo Filho (2013) apresenta duas grandes vantagens, como a possibilidade de rápida conexão e permite deformação relativa entre o tubo de vidro e o tubo metálico interno, uma vez que ao ser aquecido, o tubo de metal deformará mais que o tubo de vidro.

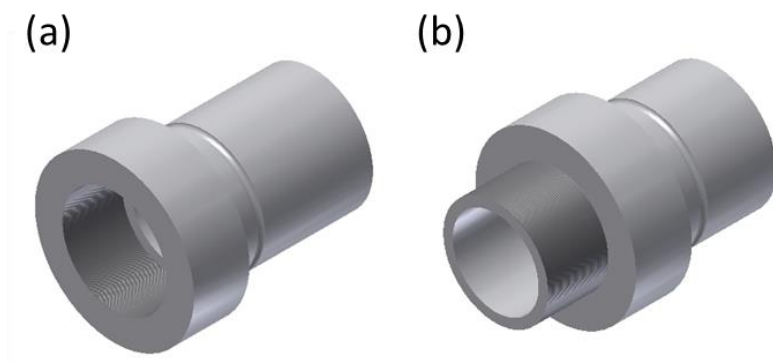
A rápida conexão permitida a partir do encaixe de topo, no qual as extremidades foram projetadas para tal, seguido da deformação das extremidades por um terceiro elemento que cria interferência entre os dois tubos e assim garante a sua estanqueidade. Já a deformação relativa é conseguida a partir da utilização de uma estrutura sanfonada para a fixação do tubo de vidro. Contudo essa conexão demanda um projeto muito sofisticado e um processo de fabricação que exige muita especialização.

Analisando a solução de Matrai (2008), percebe-se que esta é bastante simples e pode ser reproduzidas com peças comerciais, contudo ela tem uma grande limitação, que é o fato de estar conectado diretamente a estrutura do coletor. Essa desvantagem decorre do fato da conexão não acomodar as deformações inerentes ao tubo absorvedor, assim todas as deformações serão transformadas em tensões na estrutura do coletor.

Já a solução proposta por Kempfer (2011) utiliza uma conexão fabricada com Politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon. Essa conexão satisfaz todos os três requisitos para as conexões. Ele apresenta resistência à radiação solar, baixa condutividade térmica e a geometria da conexão permite que o tubo metálico deforme mais que o tubo de vidro. Entretanto esse conector apresenta duas desvantagens. A primeira desvantagem é o alto preço do PTFE que onera a construção do tubo absorvedor e a segunda é a dificuldade de conexão entre os tubos absorvedores e até mesmo conectar esse tubo em outros tubos que levam o fluido aquecido até o processo desejado.

Após o estudo de todos esses princípios de solução, chegou-se ao conceito apresentado na Figura 4.87.

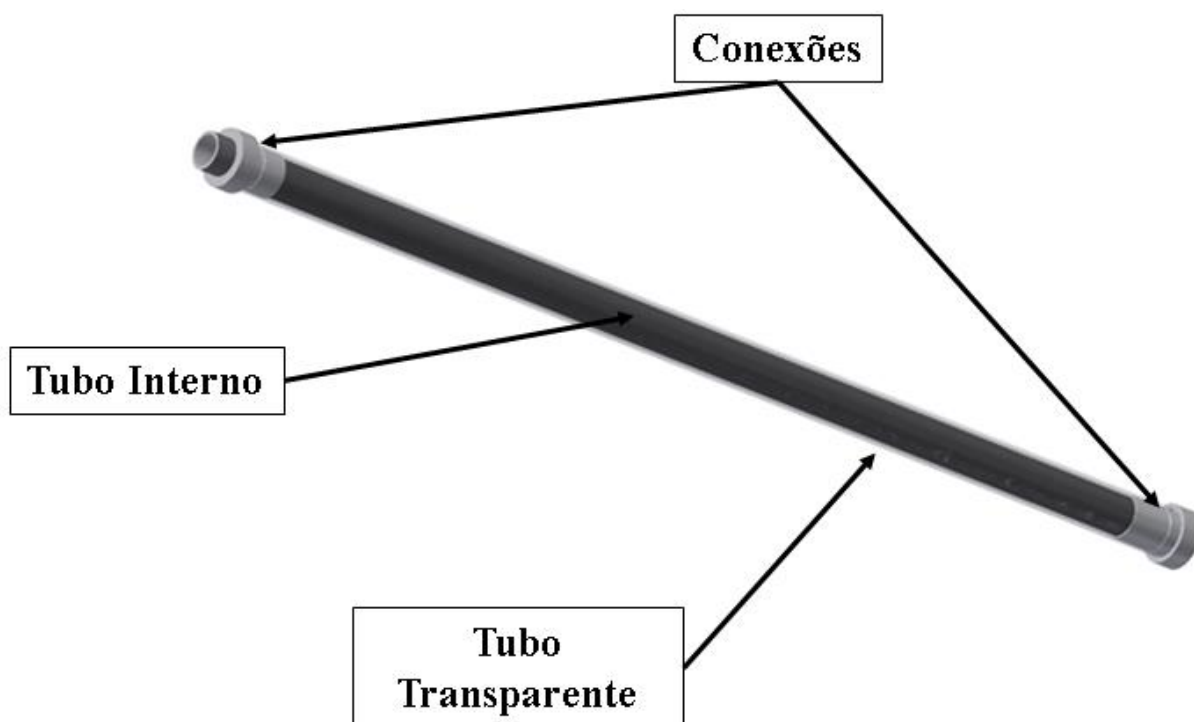
Figura 4.87 - Conexões do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico. (a) Conexão fêmea e (b) Conexão macho



Fonte: Autoria Própria

A partir do que foi mostrado no projeto conceitual nos três últimos componentes, chega-se a concepção do tubo absorvedor, mostrado na Figura 4.88.

Figura 4.88 - Conceito do tubo absorvedor utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Sistema De Rastreamento Solar

O Sistema de Rastreamento Solar é o responsável pela correção no posicionamento do coletor durante todo o dia. Essa correção é muito importante, uma vez que sem a mesma não haverá a formação de um foco linear, ou se formar será em um local diferente do foco geométrico do coletor, assim impedindo que a radiação solar chegue até o tubo absorvedor.

Assim, todo coletor que usa concentração solar precisa de um sistema de correção no posicionamento de forma a fazer com que a radiação direta incida perpendicularmente ao plano de abertura desse coletor, coincidindo então o foco luminoso com o foco geométrico.

Outro ponto que deve ser levantado com relação ao sistema de rastreamento é o fato do mesmo ser uma fonte de “perda de energia útil”, assim deve ser utilizado o menor tempo possível, desde que não permita grande perda de radiação devido ao desalinhamento do coletor.

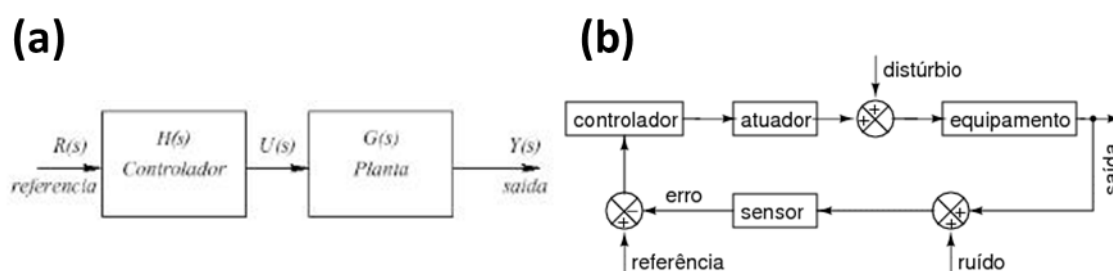
Para o correto desenvolvimento do sistema de rastreamento, o seu projeto foi dividido em Software e Hardware, onde o primeiro é o controle do sistema e o segundo são os sensores e atuadores que irão medir e corrigir o posicionamento do coletor, respectivamente.

4.2.3.1 Software de controle

Com relação ao software utilizado nesse sistema, o principal fator a ser analisado é o tipo de malha que deve ser utilizado para o controle do sistema, para assim decidir qual delas melhor atende os requisitos do projeto.

As duas principais malhas de controle utilizadas foram o controle em malha aberta e o controle em malha fechada. Esses controles são mostrados na Figura 4.89.

Figura 4.89 - Diagramas de controle do Sistema de Rastreamento Solar a ser utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico. (a) Controle em Malha Aberta e (b) Controle em Malha Fechada.



Fonte: Site: http://www.mspc.eng.br/contr/ctrl_0110.shtml acesso em: 24/07/2015

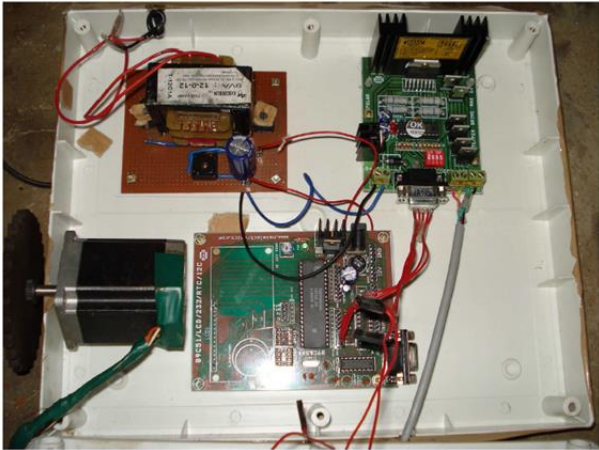
O controle em malha aberta geralmente é utilizada em três situações. Uma quando o sistema apresenta um comportamento muito simples e estável, de forma que não sofre interferência externas. Assim todos os comandos indubitavelmente levam o sistema para a condição correta. Outra condição é quando se tem dificuldade para medir a variável de interesse, seja por questão do custo do sensor ou mesmo devido a sua localização. Além do fator custo, pois o controle em malha aberta apresenta um custo bem menor do que o controle em malha fechada. Contudo a aplicação desse sistema limita bastante a precisão e estabilidade do sistema.

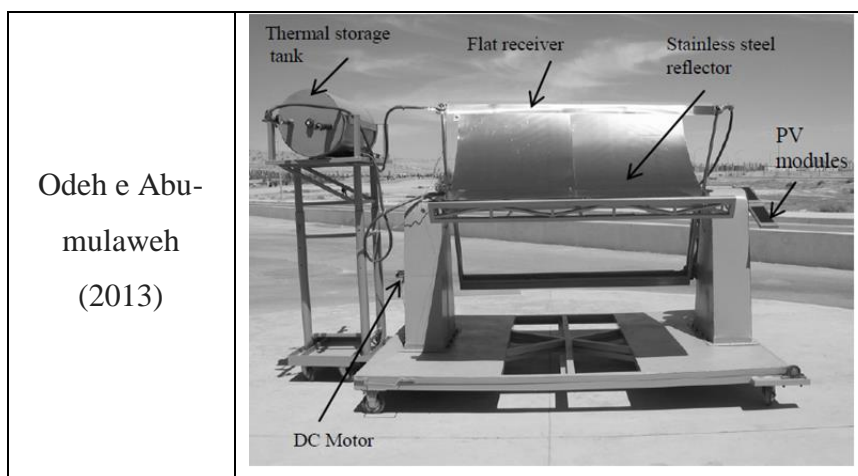
Para o controle em malha fechada, tem-se uma precisão bastante superior, pois ela executa a ação e retroalimenta o sistema informando sobre essa nova condição, cabendo assim o sistema, agora ciente da nova condição, tomar uma nova decisão. Devido essa sofisticação, a mesma apresenta maior complexidade e maior custo, seja com componente e com sensores que retroalimentaram o sistema.

Cientes das vantagens e desvantagens dos dois sistemas, passou-se a analisar as malhas utilizadas nos trabalhos estudados, os quais estão apresentados na Tabela 4.9.

No trabalho de Souza Filho (2008) é utilizado um sistema de posicionamento com malha aberta. Essa escolha foi motivada diretamente segundo critérios de custo sistema, uma vez que a ideia do sistema era o projeto de um coletor solar de baixo custo. Contudo essa escolha obrigou a realização de uma bateria de ensaios a fim de determinar quais as condições ótimas com as quais esse coletor deveria se movimentar. Assim, mesmo com tanto esforço, o coletor se torna muito instável a agentes externos, como elevadas cargas de vento que podem incidir sobre o coletor nos instantes em que o seu coeficiente de arrasto seja máximo, elevando demasiadamente as tensões sobre a estrutura, que pode levar ao empenamentos da estrutura.

Tabela 4.9 - Principais soluções para controle do posicionamento do coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Soluções
Souza Filho (2008)	
Pigozzo Filho (2013)	
Matrai (2008)	
Kumar, Srinath e Reddy (2013)	



Pigozzo Filho (2013) utiliza um controle em malha fechada para o correto posicionamento do coletor com relação ao Sol. Ele faz isso a partir de dois sensores fotovoltaicos que são colocados num plano paralelo ao plano de abertura do coletor. Assim a medida que o sol se move, haverá um diferença na tensão dos dois sensores. A partir dessa informação o sistema de controle atua para corrigir o seu posicionamento. Contudo o autor não introduziu nenhum controle que possibilitasse ao sistema entrar em posição de segurança em caso de grandes rajadas de vento.

Matrai (2008) utilizou um controle em malha aberta para o seu sistema. Contudo ele não realizou ajustes nesse, apenas supondo que o movimento do Sol seria exatamente síncrono com o movimento do relógio, contudo ao observarmos o movimento da terra em relação ao Sol, vemos que, diferente do relógio, a velocidade angular do Sol varia durante o ano. Assim utilizar um timer pode produzir apenas um resultado aproximado do posicionamento do coletor com relação ao Sol. Um outro ponto negativo desse sistema é o fato do sistema de posicionamento estar constantemente ligado, essa estratégia consome bastante energia, tornando assim o sistema “menos eficiente”.

O sistema proposto por Kumar, Srinath e Reddy (2013) também utiliza um controle em malha aberta. Contudo ele se diferencia dos demais por apresentar um acionamento intermitente. Nesse trabalho o autor determina que o tempo de acionamento será a cada 30 minutos. Nesse período ele estima que o sol terá percorrido um trajetória de $7,5^\circ$ no céu e utiliza o seu sistema de atuação para o corrigir o posicionamento exatamente nessa variação angular. A decisão de fazer controles intermitentes torna o sistema de rastreamento bastante econômico, contudo o espaço de tempo adotado pelo autor foi demasiado, o que levou o sistema a passar a maior parte do tempo desfocado e comprometerá o seu desempenho.

O controle utilizado por Odeh e Abu-mulaweh (2013) utiliza um sistema com malha fechada, fazendo uso de dois fotosensores para indicar a posição relativa entre o coletor e os raios solares. Esses fotosensores são colocados nas extremidades do coletor e a partir de uma diferença de potencial entre eles é possível para o sistema identificar o desalinhamento e atuar para corrigi-lo. As principais vantagens presentes nesse sistema são a sua precisão e seu baixo custo (relativo) para a aquisição de toda a instrumentação, entretanto o autor não faz uma análise aprofundada para selecionar um tempo de acionamento adequado para o seu sistema e decide utilizar um sistema de acionamento contínuo.

Após a análise de todos esses equipamentos optou-se por utilizar um sistema de controle com malha fechada semelhante ao apresentado por Odeh e Abu-mulaweh (2013), contudo não será utilizado o acionamento contínuo do atuador, devendo haver um estudo para determinar qual o melhor intervalo para o acionamento do coletor de maneira a não haver grandes perdas térmicas. Esse sistema será dimensionado durante a fase de Projeto Preliminar.

4.2.3.2 Mecanismo de movimentação

Após determinada a lógica a ser utilizada no controle do coletor, chega-se na fase de escolha do sistema de movimentação que melhor atende aos requisitos do projeto.


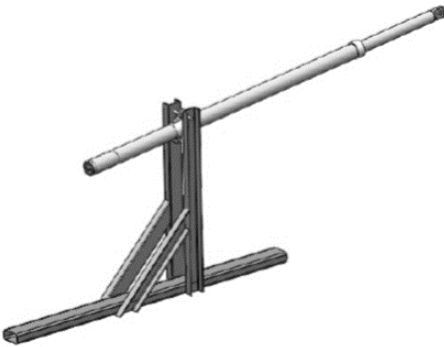
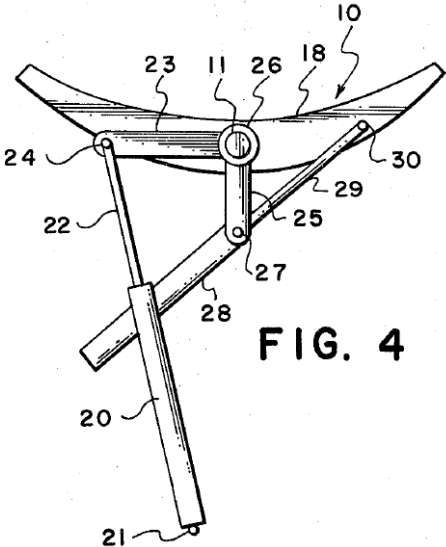
Para o correto funcionamento do coletor, o sistema de rastreamento deve proporcionar um posicionamento preciso e de baixa demanda energética. A precisão no acionamento será conseguida a partir de sistemas de acionamentos de partida lenta e suave (partida em rampa), a fim de evitar instabilidades no sistema de posicionamento. Com relação a demanda energética, será selecionado um sistema que apresentará funcionamento intermitentes e permanecerá em sua posição até o próximo acionamento (sistemas auto-travantes). Com o objetivo de atender a esses requisitos, foram estudados os sistemas apresentados na Tabela 4.10.

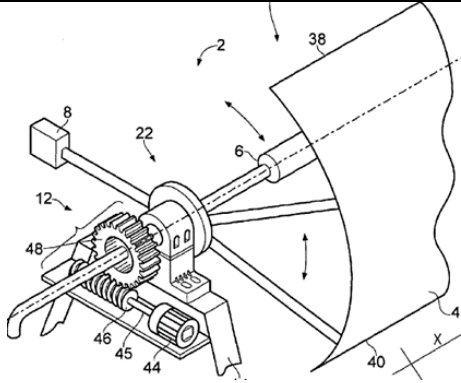

Souza Filho (2008) utilizou um pequeno motor elétrico, acoplado a uma redução, que transmitia o seu movimento para o coletor a partir de um sistema de transmissão por corrente. O sistema apresenta um consumo bem baixo de potência, o que possibilita sua movimentação a partir de uma bateria de moto. Contudo o sistema não apresenta nenhum sistema de travamento, o que obriga o motor a estar permanentemente energizado para manter o coletor na posição adequada.

Pigozzo Filho (2013) utilizou um atuador linear para a movimentação do coletor. Esse sistema funciona a partir de parafuso de rosca trapezoidal que permite uma motivação suave e, desde que seja dimensionado corretamente, o sistema autotravante, assim consumindo potência

apenas nos momentos de atuação. Contudo o sistema demanda um atuador muito longo, exigindo elevada rigidez desse atuador e podendo assim onerar o projeto.

Tabela 4.10 - Principais soluções para o atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Soluções
Souza Filho (2008)	
Pigozzo Filho (2013)	
Inc. Solar Kinetics 1979	 <p style="text-align: center;">FIG. 4</p>

<p>Dow Corning Corporation 2013</p>	
<p>Kumar, Srinath e Reddy (2013)</p>	

Já Inc. Solar Kinetics (1979) optou por utilizar dois cilindros hidráulicos menores que possibilitassem a correção do posicionamento em 180°. A utilização do sistema hidráulico permite acionamentos muito precisos, além da possibilidade de se utilizar um arranjo de válvulas que confirmam a característica de autotravamento para o atuador. Contudo essa solução apresenta dois pontos negativos, o primeiro é o sistema de acionamento, escolha que obriga a aquisição e instalação de todo um sistema para suprir os atuadores, e o segundo ponto é o fato de utilizar dois cilindros, escolha que onera mais ainda o sistema.

Dow Corning Corporation (2013) utiliza um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade do tipo coroa e parafuso sem-fim. Esse sistema atende aos requisitos de acionamento suave e o autotravamento, além de apresentar um custo baixo, com relação as demais soluções apresentadas. Além dessas vantagens, esse sistema apresenta diversos modelos comerciais, o que aumenta liberdade na escolha da velocidade de movimentação do sistema, além de facilitar a aquisição e manutenção desse componente.

Kumar, Srinath e Reddy (2013) escolheram utilizar um motor de passo como atuador. Essa escolha proporciona um grande simplicidade construtiva, uma vez que esse motor apresenta um excelente controle de posição e de rotação, assim dispensando redutores de velocidade. Contudo apresenta uma baixa relação peso-potência, obrigado a utilização de grandes motores para o acionamento do coletor, onerando assim o seu projeto. Outro ponto

negativo consiste na necessidade do motor estar energizado para manter a sua posição, obrigando o sistema a permanecer ligado durante todo o dia, provocando o consumo maior de energia.

Finalizado o estudo dessas soluções, optou-se por uma solução similar a apresentada por Souza Filho (2008), substituindo o seu redutor de velocidade por um sistema autotravante do tipo coroa e parafuso sem-fim. Essa escolha proporciona um sistema de acionamento com custo compatível com o projeto, apresentando fácil aquisição e manutenção, além de utilizar apenas energia elétrica, não sendo necessário a instalação de sistemas auxiliares.

O conceito do atuador utilizado nesse projeto é mostrado na Figura 4.90. Percebe-se que se trata de um motor elétrico que transmite movimento para um redutor do tipo coroa e parafuso sem-fim. Nesse redutor é acoplado um sistema de transmissão por corrente que transferirá o movimento de giro para a estrutura do coletor.

Figura 4.90 - Conceito do atuador utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

Assim finaliza-se o projeto conceitual do Sistema de Rastreamento Solar. Sua montagem será apresentada ao final dessa etapa quando for apresentado o conceito do sistema completo.


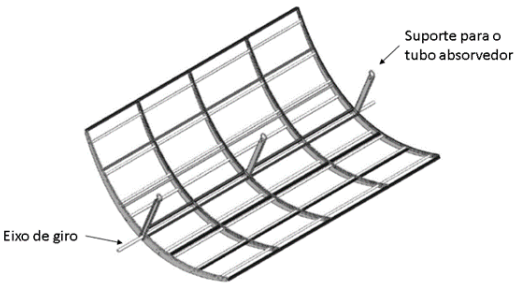

4.2.4 Estrutura



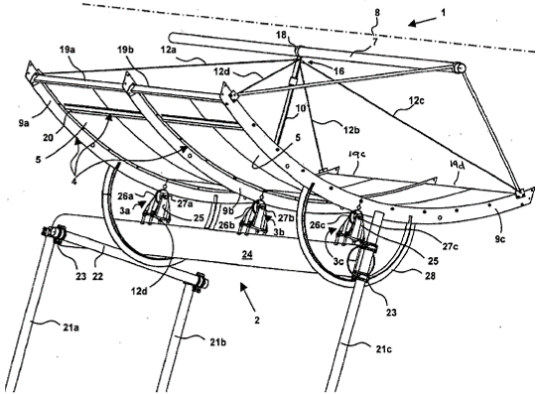
A estrutura do coletor é responsável pela sustentação e pelo correto posicionamento dos subsistemas: Superfície Refletora, Tubo Absorvedor e o Sistema de Rastreamento Solar.

Os principais requisitos para esse subsistema são a precisão construtiva e a elevada resistência mecânica, que impeça a ocorrência de deformações que prejudiquem as propriedades óticas do coletor.

Os modelos de estrutura estudados são mostrados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Princípios de soluções para a estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.

Autor	Solução
Souza Filho (2008)	
Pigozzo Filho (2013)	
Matrai (2008)	

<p>Ho e Ito (2007)</p>	
<p>Kumar, Srinath e Reddy (2013)</p>	
<p>Amaton SA 2010</p>	

Souza Filho (2008) construiu um coletor a partir de sucata, pois o seu objetivo era um coletor de baixo custo que pudesse ser confeccionado por um cidadão comum, preferencialmente aqueles das classes E e F. Contudo o autor não realizou nenhuma análise estrutural que tentasse prever o comportamento do coletor quando submetido a carregamentos externos. Assim o resultado é uma estrutura aparentemente frágil, a qual não se pode fazer mais análises devido à pouca informação presente nessa dissertação, no tocante a parte estrutural.

A mesma condição de falta de análises estrutural do coletor é encontrada em Ho e Ito (2007) que, apesar de ter projetado e fabricado um coletor, estruturalmente mais robusto que o anterior, o fez simplesmente por motivos estéticos. Para esse autor, uma boa metodologia de análise estrutural torna-se de extrema necessidade, uma vez que ele, por questões de custo,

resolveu utilizar madeira na fabricação da sua estrutura, sendo esse compósito mais frágil e de análise mais complicada do que o aço, que foi utilizado no trabalho de Souza Filho (2008).

Também faltou a Matrai (2008), uma análise estrutural do seu coletor. Contudo esse autor, ciente de que estava trabalhando com madeira, tomou diversas precauções para aumentar a robustez da sua estrutura. Apenas para citar dois exemplos, ele utilizou um perfil parabólico com seção variável, colocando mais massa onde os esforços de flexão e torção são maiores e colocou mãos francesas em sua estrutura para diminuir os esforços de flexão.

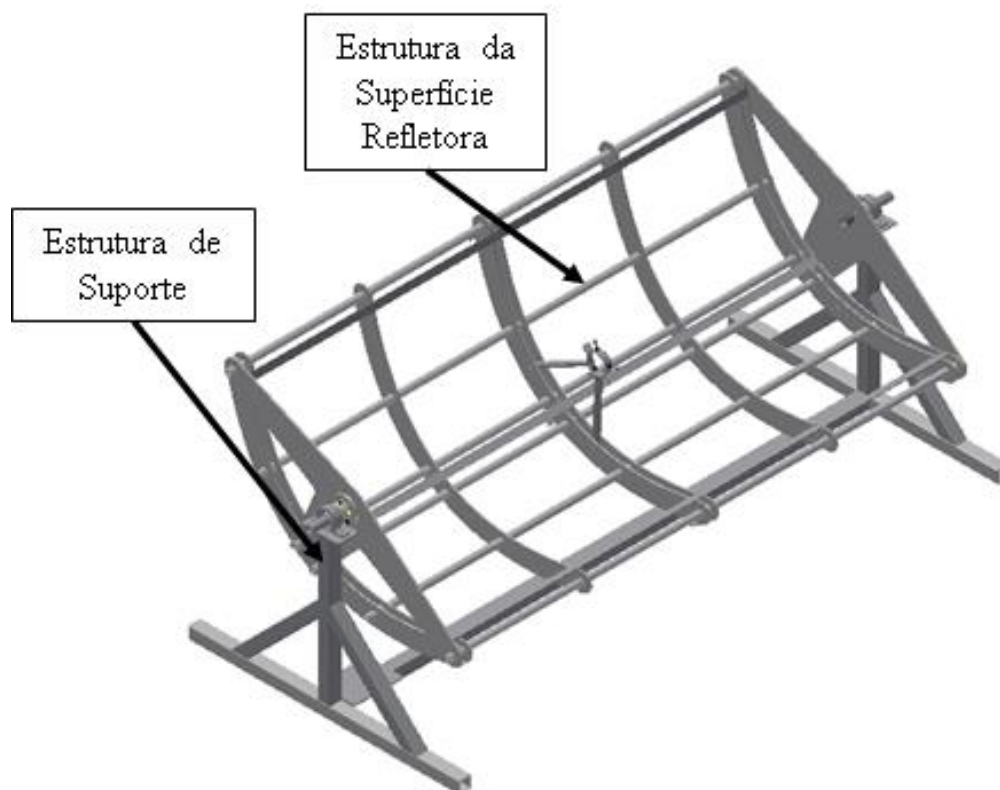
Kumar, Srinath e Reddy (2013) também optou por uma estrutura de baixo custo, contudo não menciona qualquer esforço no tocante a analisar como seria o comportamento do seu coletor quando submetido à cargas de vento. Entretanto uma das escolhas feitas pelo autor que mais pode trazer problemas, é aquela de utilizar apenas três pontos de apoio para a superfície refletora, pois essa quando submetida a pressões externas, sofrerá deformações desviando-a assim do seu perfil parabólico e por consequência diminuindo sua eficiência ótica.

Pigozzo Filho (2013) utilizou um sistema de elevada robustez para o seu coletor. A única ressalva feita com relação a essa estrutura foi a necessidade de uma máquina de corte controlada por computador (CNC) para o corte do perfil parabólico das costelas do coletor, o que eleva o custo da estrutura.

Já Amaton SA (2010) sugere uma estrutura menos robusta que a de Pigozzo Filho (2013). Entretanto ele propõe um conjunto de amarras que tem por objetivo elevar a rigidez da estrutura, sem que para isso tenha que elevar o peso nem o custo da mesma. Contudo a utilização desse conceito exige um detalhado estudo estrutural do coletor, a fim de colar as amarras nos locais de maior deformação, assim aumentando a robustez da estrutura.

Finalizando a análise de todas essas estruturas, é proposto um conceito similar ao utilizado por Pigozzo Filho (2013), guardando as diferenças no tocante a fixação da calha na estrutura e da fixação da superfície refletora na calha. O conceito da estrutura utilizada nesse trabalho é apresentada na Figura 4.91.

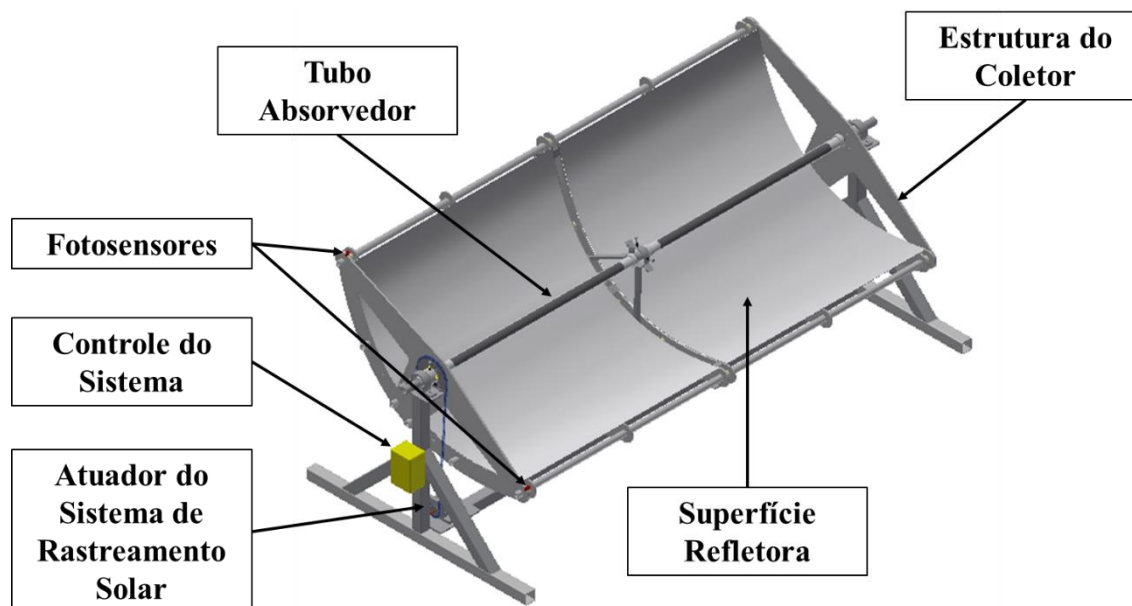
Figura 4.91 - Conceito da Estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

Tendo determinado o Projeto Conceitual para todos os subsistemas do coletor solar cilíndrico parabólico, chega-se ao fim dessa etapa do projeto. O Projeto Conceitual do coletor solar cilíndrico parabólico é mostrado na Figura 4.92.

Figura 4.92 - Projeto Conceitual do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

A próxima etapa do projeto é o Projeto Preliminar, onde, a partir dos conceitos apresentados até o momento, será dimensionado e selecionado os materiais que atenderão aos requisitos levantados durante a etapa de Projeto Informacional.

4.3 Projeto Preliminar do coletor solar cilíndrico parabólico

Essa etapa do projeto tem por finalidade, utilizar os conceitos já determinados para os diversos subsistemas e a partir deles executar o correto dimensionamento e seleção de materiais de forma a atender os requisitos já expostos. Para o dimensionamento serão utilizadas as equações já apresentadas no capítulo 2, onde a partir do fenômeno de interesse, serão determinados dimensões e materiais que possibilitem a esses fenômenos ocorrerem de acordo com os requisitos já especificados.

Por se tratar de um projeto realizado em parceria com a empresa e tendo a mesma financiado todo o desenvolvimento do projeto, assim assumido todos os riscos inerentes ao processo de inovação tecnológica, essa faz uso do seu direito de tornar público apenas uma parte das informações geradas durante essa fase do projeto.

Uma vez que cada subsistema apresenta formas e funções diferentes e por esse motivo são regidos por fenômenos diferentes, esses serão dimensionados separadamente.

4.3.1 Superfície refletora

O primeiro parâmetro a ser determinado é a área de coleta do coletor. Essa escolha é arbitrária, dependendo apenas da carga térmica desejada pelo projetista. A carga térmica arbitrada foi de 700 Watts. Nessa fase inicial foram utilizados valores médios encontrados na literatura. Assim a área do coletor é calculada a partir da equação:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \eta \dot{Q}_{\text{ent}} \quad 4.9$$

onde,

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = \dot{Q}_{\text{disp}} A_{\text{coletor}} \quad 4.10$$

Substituindo a equação 4.10 na equação 4.9, tem-se:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \eta (\dot{Q}_{\text{disp}} A_{\text{coletor}}) \quad 4.11$$

$$A_{\text{coletor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\eta \dot{Q}_{\text{disp}}} \quad 4.12$$

onde:

- Energia demandada do coletor ($\dot{Q}_{\text{útil}}$) é de 700 Watts;
- Eficiência esperada para o coletor (η) estimada em 35%;
- Energia térmica solar desnível (\dot{Q}_{disp}) estimada em 1 kW/m²;

Assim a área do coletor será de:

$$A_{\text{coletor}} = 2,00 \text{ m}^2$$

Tendo determinado a área do coletor (área projetada), escolhe-se o ângulo de borda e a distância focal. O ângulo de borda (ψ) escolhido foi 90°, pois está de acordo com as melhores práticas, facilitando a obtenção de um maior fator de interceptação. A distância focal (f) adotada será de 0,25 metros, pois o tubo absorvedor deverá ser colinear com os dois pontos de apoio do coletor, para evitar a utilização de tubos flexíveis no projeto. Com essas duas variáveis utilizou-se a equação:

$$a/f = -\frac{4}{\tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2\psi} + 16} \quad 4.13$$

onde

- a - Abertura do coletor;
- f - Distância focal;
- ψ - Ângulo de borda.

Como, $\tan 90^\circ \rightarrow \infty$, a equação 4.13 é simplificada para:

$$a = 4f \quad 4.14$$

Substituindo $f = 0,25$ na equação 4.14, tem-se:

$$a = 1 \text{ m}$$

Assim a abertura do coletor será de 1 metro. Com essa informação, utiliza-se a equação 4.15 para de determinar o comprimento do coletor:

$$A_{ap} = al \quad 4.15$$

onde,

- A_{ap} - Área projetada do coletor;
- l - Comprimento do coletor.

Substituindo os valores $A_{ap} = A_{coletor} = 2,00 \text{ m}^2$ e $a = 1 \text{ m}$, na equação 4.14, tem-se:

$$l = 2,00 \text{ m}$$

Após a determinação da área projetada do coletor, deve-se determinar a área verdadeira da sua superfície refletiva. Por se tratar de uma superfície parabólica, sua área projetada não é igual a área da superfície de reflexão. Para determinar a área da superfície de reflexão utiliza-se a equação 4.16:

$$A_{sup.ref.} = a_{modificada} l \quad 4.16$$

Mantendo o comprimento (l), calculamos a nova largura da folha metálica que será utilizada como superfície refletora, utilizando a equação 4.17:

$$a_{modificada} = \left(\frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2f * \ln \left(\frac{a}{4f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \quad 4.17$$

Substituindo os valores de $a = 1 \text{ m}$ e $\psi = 90^\circ$, na equação 4.17, tem-se:

$$a_{modificada} = 1,148$$

Assim a área da superfície refletora será de:

$$A_{sup.ref.} \approx 2,3 \text{ m}^2$$

Após a determinação das dimensões da superfície refletiva, deve-se agora determinar a qual o material deverá ser utilizado. Devido a carência de materiais com alta refletividade comercializados nacionalmente, os principais parâmetros utilizados para selecionar os materiais foram a disponibilidade nacional, possibilidade de aquisição unitária e preço. A partir desses parâmetros chegou-se a Tabela 4.12.

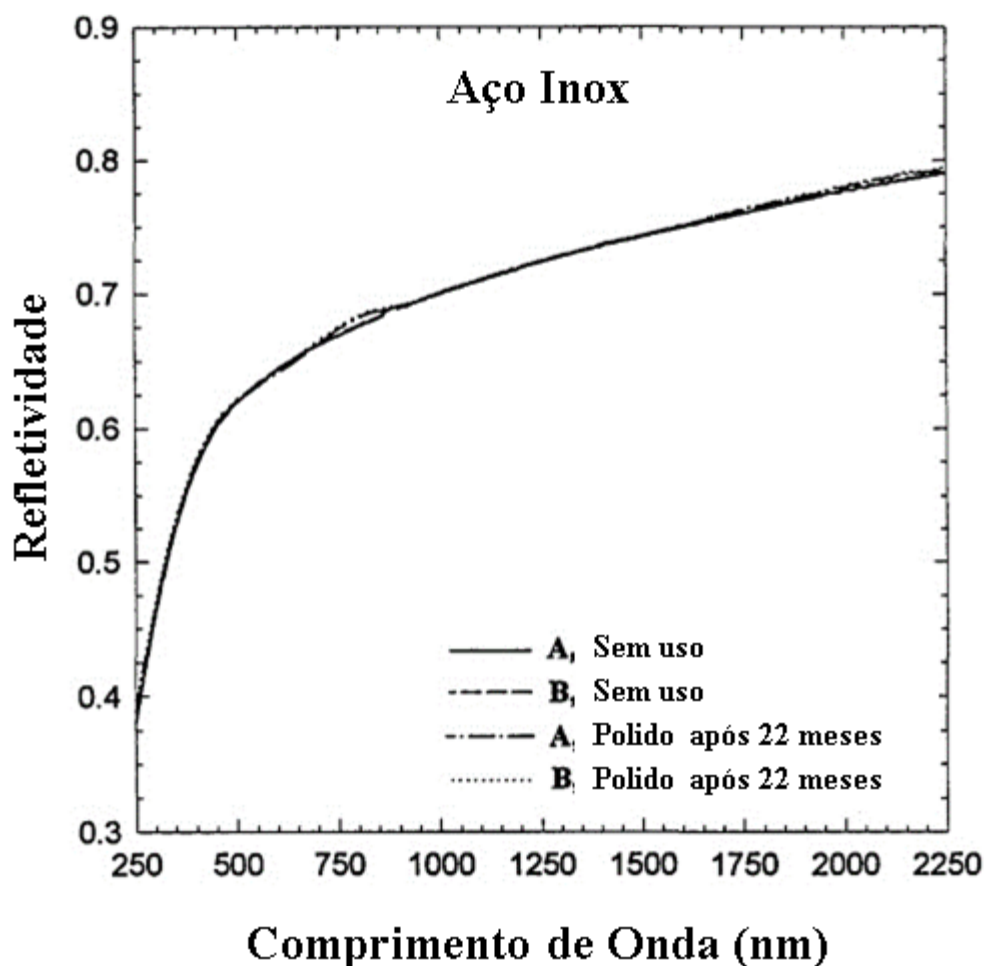
Inicialmente, as duas principais opções foram a chapa de alumínio polida e a chapa de aço polida. Embora o alumínio polido apresente o refletividade aproximadamente 30% superior ao aço polido, esse apresenta-se bem menos resistentes as intemperes ambientais, perdendo assim o seu brilho com maior rapidez, além ser quase duas vezes mais caro. Por esses motivos foi escolhido o aço polido como superfície refletora. Foi escolhido o aço inox 304 polido, e que apresenta a refletividade mostrada na Figura 4.93.

Tabela 4.12 - Comparação entre materiais da superfície refletiva.

Produto	Custo	Observações
Vidro espelhado grosso	~300 U\$*	Cotação para grande volume
Vidro espelhado fino	~350U\$ *	Cotação para grande volume
Chapa de Alumino polida	~120 R\$ - 300U\$*	Chapa Unitária
Chapa de aço polida	~160 R\$	Chapa Unitária
Filme de Prata em alumino	~140 U\$*	Cotação para grande volume

Fonte: Autoria própria

Figura 4.93 - Refletividade do aço inox 304 com o comprimento de onda




Fonte: site: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-33-34-7933> acesso em:

27/07/2015

A partir dessa informação, consultou-se catálogo de chapas de inox refletivo (Figura 4.94), que será utilizada como superfície refletora. Observa-se que a chapa de 2x1,2 é a que mais se aproxima das dimensões calculadas para a superfície, assim atualiza-se a área da superfície refletiva para 2,4 m².

Determinada a chapa que irá ser utilizada para a superfície de reflexão, finaliza-se o Projeto Preliminar da Superfície Refletora.

Figura 4.94 - Catálogo de chapas de aço inox refletivo.



Chapas de Aço Inoxidável							
ESPESSURAS			Dimensões / Peso Teórico				
Nominais mm	Polegadas	No U.S.G.	Kgs p/ m²	2 m x 1 m kg	2 m x 1,20 m kg	3 m x 1 m Kg	3 m x 1,20 m Kg
0,30	-	30	2,47	4,90	5,90	7,40	8,90
0,40	1/64"	28	3,30	6,60	7,90	9,90	11,90
0,50	-	26	4,12	8,20	9,90	12,40	14,80
0,60	-	24	4,94	9,90	11,90	14,80	17,80
0,80	1/32"	22	6,59	13,20	15,80	19,80	23,70
1,00	-	20	8,24	16,50	19,80	24,70	29,70
1,20	-	18	9,89	19,80	23,70	29,70	35,60
1,50	1/16"	16	12,36	24,70	29,70	37,10	44,50
2,00	5/64"	14	16,48	33,00	39,60	49,40	59,30
2,50	-	13	20,60	41,20	49,40	61,80	74,20
2,75	7/64"	12	22,66	45,30	54,40	68,00	81,60
3,00	1/8"	11	24,72	49,40	59,30	74,20	89,00
3,50	9/64"	10	28,84	57,70	69,20	86,50	103,80
4,00	5/32"	9	32,96	65,90	79,10	98,90	118,70
4,50	11/64"	8	37,08	74,20	89,00	111,20	133,50
4,76	3/16"	7	39,22	78,40	94,10	117,70	141,20
5,00	-	6	41,20	82,40	98,90	123,60	148,30
5,50	7/32"	5	45,32	90,60	108,80	136,00	163,20
6,00	-	4	49,44	98,90	118,70	148,30	178,00

Fonte: site: <http://www.minasinox.com.br/tabelas/10%20-%20CHAPAS.jpg>, acesso em:

27/07/2015

4.3.2 Tubo absorvedor

O dimensionamento do tubo absorvedor deve garantir o maior fator de interceptação possível, sem que para isso aumente-se demasiadamente as perdas térmicas para o ambiente.

O correto dimensionamento tem início pela determinação do diâmetro externo do tubo interno, que é dado pela equação 4.17.

$$D = 2r_r \sin(\theta_m) \quad 4.18$$

onde $r_r = 0,5$ e $\theta_m = 0,26^\circ$, assim o diâmetro externo será:

$$D = 4,5 \text{ mm}$$

Após determinado o diâmetro externo do tubo interno, o próximo passo é determinar o diâmetro interno do tubo transparente. A situação ideal para o tubo absorvedor, é alcançada onde no espaço anular, entre o tubo interno e o tubo transparente, ocorra apenas perdas térmicas

por condução, uma vez que o ar apresenta uma condutividade térmica muito baixa, podendo em algumas situações ser considerado como um isolante. Contudo caso passe a ocorrer convecção livre dentro do tubo, as perdas térmicas serão bem acentuadas. Dessa forma, o dimensionamento ótimo passa pela determinação da máxima espessura da camada de ar (gap), minimizando assim as perdas por condução, sem que haja perdas térmicas por convecção livre no espaço anular.

Para determinar qual é o espaço anular ótimo, utiliza-se Raythby e Hollands para a convecção livre para um fluido confinado no espaço anular entre dois cilindros longos, horizontais e concêntricos (Incropera, 2011). Como parâmetro esse estudo estabelece que para $Ra_c^* < 100$ não haverá convecção livre no fluido confinado. Para esse estudo, as equações utilizadas foram:

$$Ra_c^* = \frac{\left[\ln \frac{D_o}{D_i} \right]^4}{L^3 \left(D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5} \right)^5} Ra_L \quad 4.19$$

onde,

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_e)L^3}{\nu\alpha} \quad 4.20$$

Essas equações são resolvidas com auxílio do software Scilab e o resultado é sempre um compromisso entre o diâmetro externo do tubo interno e o diâmetro interno do tubo transparente. Por esse motivo ele é apresentado em forma de gráfico, mostrado na Figura 4.95. A partir do gráfico (linha vermelha) vemos que o diâmetro interno do tubo transparente é de 20 mm.

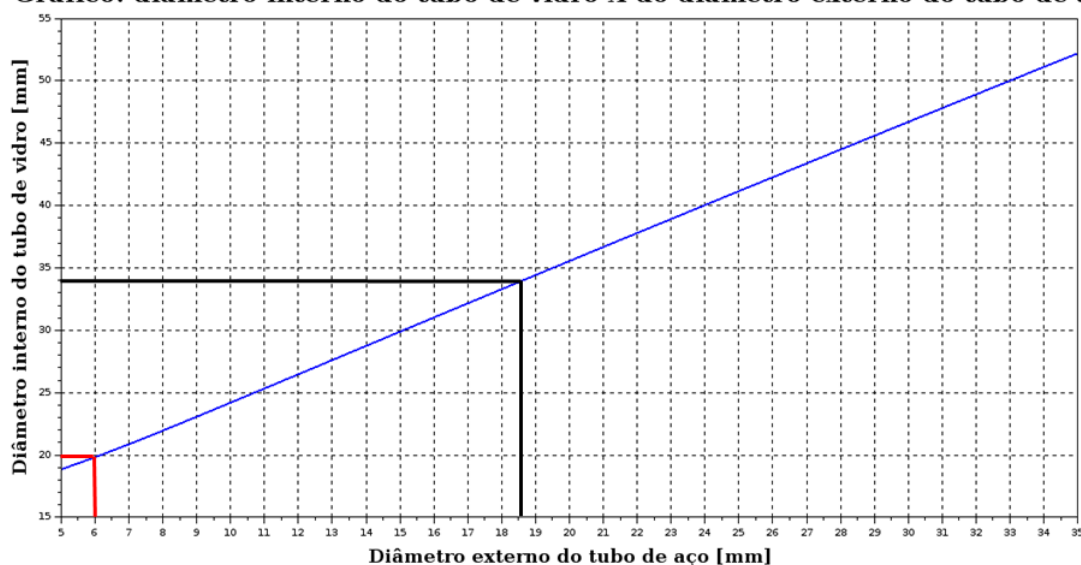
Contudo ao recorrer ao comércio local, não foi encontrado essa especificação para o tubo de vidro. Por esse motivo foi escolhido o tubo que mais se aproximasse desse diâmetro. O tubo mais próximo apresentou um diâmetro interno de 34 mm. Foi feita uma nova marcação sobre o gráfico (linha preta), dessa vez tendo como ponto de partida o diâmetro interno do tubo de vidro. Como resultado tem-se um diâmetro externo do tubo interno de 18,5 mm.

Para a fabricação foi escolhido aço comum recoberto com a camada preta. Foi utilizado o aço comum devido a seu preço e facilidade de aquisição. Outra vantagem desse aço é a camada preta, com a qual ele é comercializado, que melhora a absorvidade do tubo, além de protege-

lo contra a corrosão causada pelo meio ambiente. Desta forma utiliza-se o tubo de aço comum e estima-se as suas propriedades radiativas de emissividade e absortividade iguais a 0,98.

Figura 4.95 - Determinação do diâmetro interno do tubo transparente a partir do diâmetro externo do tubo interno

Gráfico: diâmetro interno do tubo de vidro X do diâmetro externo do tubo de aço



Fonte: Autoria Própria

A partir da determinação do material do tubo interno, verifica-se na tabela mostrada na Figura 4.96 os diâmetros comerciais de tubos metálicos disponíveis no mercado. Como não existe o diâmetro especificado, a melhor aproximação é conseguida utilizando-se o diâmetro de 3/8”.

Figura 4.96 - Diâmetros comerciais para o tubo interno

Nominal pol.	Externo m/m	Interno m/m	Parede m/m	Kg/m
1 / 4"	13,50	8,80	2,35	0,65
3 / 8"	17,20	12,50	2,35	0,85
1 / 2"	21,30	16,00	2,65	1,22
3 / 4"	26,90	21,60	2,65	1,58
1"	33,70	27,20	3,25	2,44
1 1/4"	42,40	35,90	3,25	3,14
1 1/2"	48,30	41,80	3,25	3,61
2"	60,30	53,00	3,65	5,10
2 1/2"	76,10	68,80	3,65	6,51
3"	88,90	80,80	4,05	8,47
4"	114,30	105,30	4,50	12,10
5"	139,70	130,00	4,85	16,20
6"	165,10	155,40	4,85	19,20
8"	219,10	206,40	6,35	33,35



Fonte: site: http://www.karferro.com.br/produtos_tubos_pretos_e_galvanizados.html Acesos

em:28/07/2015

Como já mencionado, foi utilizado um tubo de vidro comum, onde esse apresenta a transmissividade de aproximadamente 0,8. Assim finaliza-se o Projeto Preliminar do tubo absorvedor.

4.3.3 Sistema de rastreamento Solar

Para esse subsistema serão feitas apenas considerações breves com relação a seleção do atuador, sendo as demais informações restritas a Suna Engenharia.

O atuador a ser utilizado nesse coletor apresenta uma extrema dificuldade para ser selecionado. Essa dificuldade advém da baixa rotação necessária para a realização de um posicionamento preciso. Para quantificar a rotação necessária para o motor, divide-se a sua rotação diária, que é de 0,5 rotações (180°), durante 12 horas (720 minutos), assim:

$$\omega = \frac{n}{\Delta t}$$

$$\omega = 6,9 * 10^{-4} rpm$$

Como vê-se, o coletor se move numa velocidade extremamente baixa. Para que um motor-reductor apresentasse essa rotação, deveria passar por uma redução extremamente grande, geralmente só atingida por reduções especiais. Assim o desafio foi como determinar as variáveis do posicionamento do coletor, como tempo entre acionamentos e tempo que o motor permanece atuado, para que um motor comum pudesse ser utilizado como atuador do coletor.

A primeira variável a ser determinada foi decidir entre o motor CC (Corrente contínua) ou CA (Corrente Alternada). Foi utilizado um motor CA, por que os motores de corrente contínua de alta potência apresentam uma elevada demanda de corrente, o que causa um aumento exagerado do custo do motor, além de exigir manutenções frequentes, aumentando assim os custos variáveis do sistema.

A segunda variável seria a redução utilizada, que conferiria o torque e a rotação desejada. A princípio a primeira opção para esse sistema de atuação foi um motor de portão residencial, como o mostrado pela Figura 4.97. Foi escolhido esse motor por cinco motivos:

- Apresentar elevado torque;
- Apresentar baixa rotação;
- Girar tanto no sentido horário quanto anti-horário;
- Fácil Aquisição;

- Já é comercializado com o pinhão necessário para transmissão por corrente.

Foi selecionado um motor que apresentava a rotação de 1740 rpm acoplado a uma redução de 1:60, assim apresentando uma rotação de saída de 29 rpm. Essa rotação era demasiadamente alta, contudo foi decidido que seria acoplado outra redução na saída do eixo do motor a fim de adequar a sua rotação a necessidade do coletor. Contudo essa redução seria determinada após alguns testes preliminares do motor, que tinham por finalidade observar como o mesmo se comportava sob condições as quais iria operar o coletor. Essas condições eram:

- Acionamentos curtos e frequentes;
- Sistema constantemente sob carga;
- Travamento realizado pelo próprio sistema de redução do motor.

Vale ressaltar aqui que não é apresentado a ficha técnica do motor, pois o motor foi adquirido de uma loja de manutenção de máquinas elétricas, que recondiciona máquinas elétricas e as vende. Contudo eles não possuíam as especificações exatas do motor, informando apenas a rotação desse, sendo todas as outras variáveis mencionadas acima sido conseguidas a partir de testes e inferências diretas.

Figura 4.97 - 1ª opção para atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



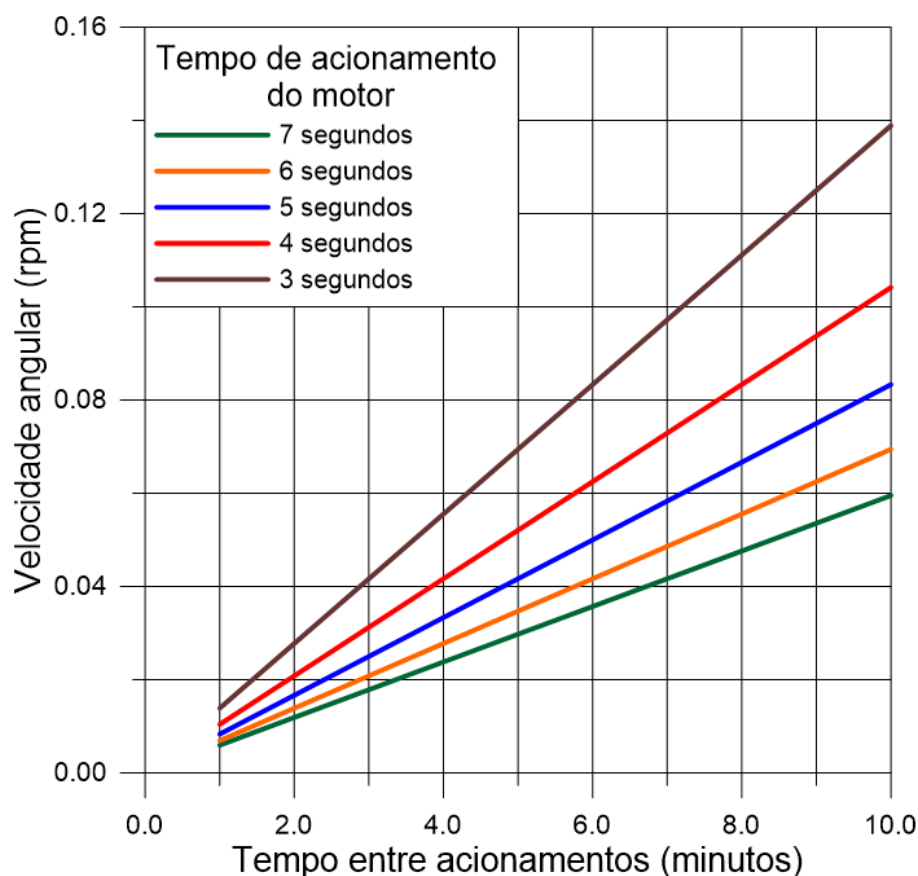
Fonte: http://www.upperseg.com.br/ecommerce_site/produto_18780_10658_Kit-Automatizador-Deslizante-1-4-Portao-Eletronico-Slider-Maxi-Speedy-RCG acesso em

28/07/2015

Após esses testes, caso o motor suportasse essas condições, deveria ser selecionada ou projetada uma segunda redução que permitisse a esse motor acionar adequadamente o coletor solar. Para a terminação de qual deveria ser essa redução, foi elaborado um gráfico que correlaciona as três principais variáveis para a seleção do atuador do coletor solar cilíndrico parabólico. Esse gráfico é mostrado na Figura 4.98. Esse gráfico permite correlacionar as variáveis:

- **Velocidade de Rotação:** Rotação na saída do sistema de redução;
- **Tempo entre acionamentos:** Tempo que o motor permanece parado entre um acionamento e o acionamento seguinte.
- **Tempo de Atividade:** Tempo que o motor, após o seu start, permanece acionado.

Figura 4.98 - Seleção do atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

O “Tempo de atividade” se inicia em 3 segundos de operação, pois foi arbitrado, após uma reunião com um engenheiro eletricista da empresa, que um tempo acima de 2 segundos seria um tempo bem seguro para o sistema sair do período transiente pelo qual ele passa durante a sua partida. Por esse motivo, um acionamento menor do que dois segundos, poderia levar o sistema a instabilidade, devido a essa faixa de transição enfrentada pelo motor.

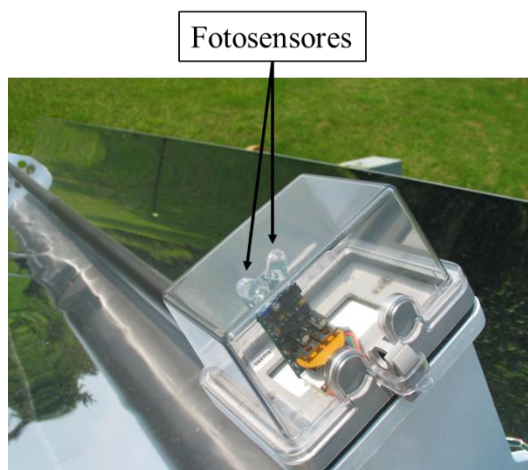
A utilização do gráfico apresentado na Figura 4.98 permite, a partir da determinação de duas das variáveis, a determinação da terceira que será adequada ao sistema.

Como o motor selecionado não se trata de uma montagem comercial, o mesmo ainda passará por testes para determinação de seus parâmetros de trabalho. Não sendo possível a determinação das variáveis nessa etapa do projeto, esse gráfico será utilizado apenas nas etapas de testes com o atuador operando junto com o coletor solar.

Para garantir o correto posicionamento do Coletor Solar, deve ser utilizado um sistema de posicionamento que indique quando o plano de abertura do coletor está perpendicular aos raios solares. Para isso foram utilizados dois foto sensores dispostos a 90°, como mostrado na Figura 4.99.

Nessa configuração, quando os dois sensores recebem a mesma quantidade de radiação, eles geram a mesma tensão, nesse momento o sistema intende que o coletor está perfeitamente perpendicular com relação aos raios solares e assim o atuador para de funcionar. Assim o sistema deve funcionar com duas lógicas, uma em malha aberta, a partir da Figura 4.98 e em malha fechada a partir do sistema similar ao apresentado na Figura 4.99.

Figura 4.99 - Sistema de controle de inclinação a partir de dois fotosensores



Fonte: <http://www.ffwdm.com/solar/solar-index.htm> acesso em 28/07/2015

Assim finaliza-se a fase de Projeto Preliminar do Sistema de Rastreamento Solar.

4.3.4 Estrutura

Por se tratar de uma estrutura complexa, a análise do coletor deve ser realizada a partir de ferramentas computacionais que permitam inserir toda a complexidade em um modelo 3D. Para realizar essa análise foi utilizado o Software Autodesk Inventor 2015, disponibilizado pela empresa, para os estudos estruturais do coletor. Esse software permite a realização de análises estáticas e dinâmicas de estruturas.

Por não apresentar significativos carregamentos dinâmicos durante a operação, só foram realizadas análises estáticas no coletor. Para a realização dessas análises, foi dimensionada uma estrutura de acordo com a apresentada no Projeto Conceitual, utilizando os valores já calculados até esse ponto do Projeto Preliminar.

Como mostrado durante a fase de Projeto Conceitual, a estrutura do coletor é dividida em Estrutura de Suporte e Estrutura da Superfície Refletora. Como a Estrutura da Superfície Refletora apresenta uma importância mais crítica para a eficiência do coletor, optou-se por realizar os ensaios apenas dessa estrutura.

Para o dimensionamento da estrutura foi utilizado o critério do maior esforço. Para esse critério é determinado os maiores esforços exercidos sobre a estrutura e o dimensionamento é feito levando em consideração apenas aqueles carregamentos atuantes sobre a estrutura.

Dessa forma foi criado um modelo 3D no Autodesk Inventor que melhor representasse o Coletor Solar Cilíndrico Parabólico. Como já mencionado nesse texto, o principal carregamento que atua sobre o coletor, são as cargas de vento. Essas rajadas de vento geram, principalmente, esforços de flexão e de torção na Estrutura da Superfície Refletora. Por ser de elevada complexidade a análise combinada desses dois esforços acoplados, eles foram analisados separadamente nas simulações.

Para a determinação da velocidade de vento característica da região, fez-se uma consulta ao Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, que disponibilizou dados da velocidade de ventos na Paraíba. Nesses documentos disponibilizados, foi mostrado que os ventos podem chegar até 15 m/s em determinadas regiões. Assim a estrutura foi dimensionada para suportar essa velocidade de vento e não apresentar deformações plásticas, nem apresentar deformações elásticas que comprometam as qualidades óticas da Superfície Refletora.

Para a simulação dos esforços na estrutura do coletor foi utilizado uma metodologia similar a apresentada por Venegas-Reyes (2012), onde ele dimensiona o seu coletor a partir de

dois esforços predominantes, o esforço de flexão e o esforço de torção. Nessa mesma linha de raciocínio, realizou-se as simulações na estrutura. Nessas simulações, os esforços de pressão foram traduzidos em esforços pontuais atuando na estrutura e são dispostos a gerar os esforços de interesse, a fim de analisar o comportamento da estrutura quando submetidos a esses esforços. Vale também ressaltar que todas as análises foram feitas no momento de esforço máximo para o coletor, ou seja, quando esse está posicionado a 90° com relação ao vento.

As simulação para análises do comportamento da estrutura quanto a flexão é mostrada na Figura 4.100. Para essa simulação é calculada a força exercida pela pelo vento na estrutura. Essa força é calculada pela equação 4.18, mostrada em Potter e Wiggert (2009):

$$F_D = 1/2 \rho C_d A v_\infty^2 \quad 4. 21$$

onde,

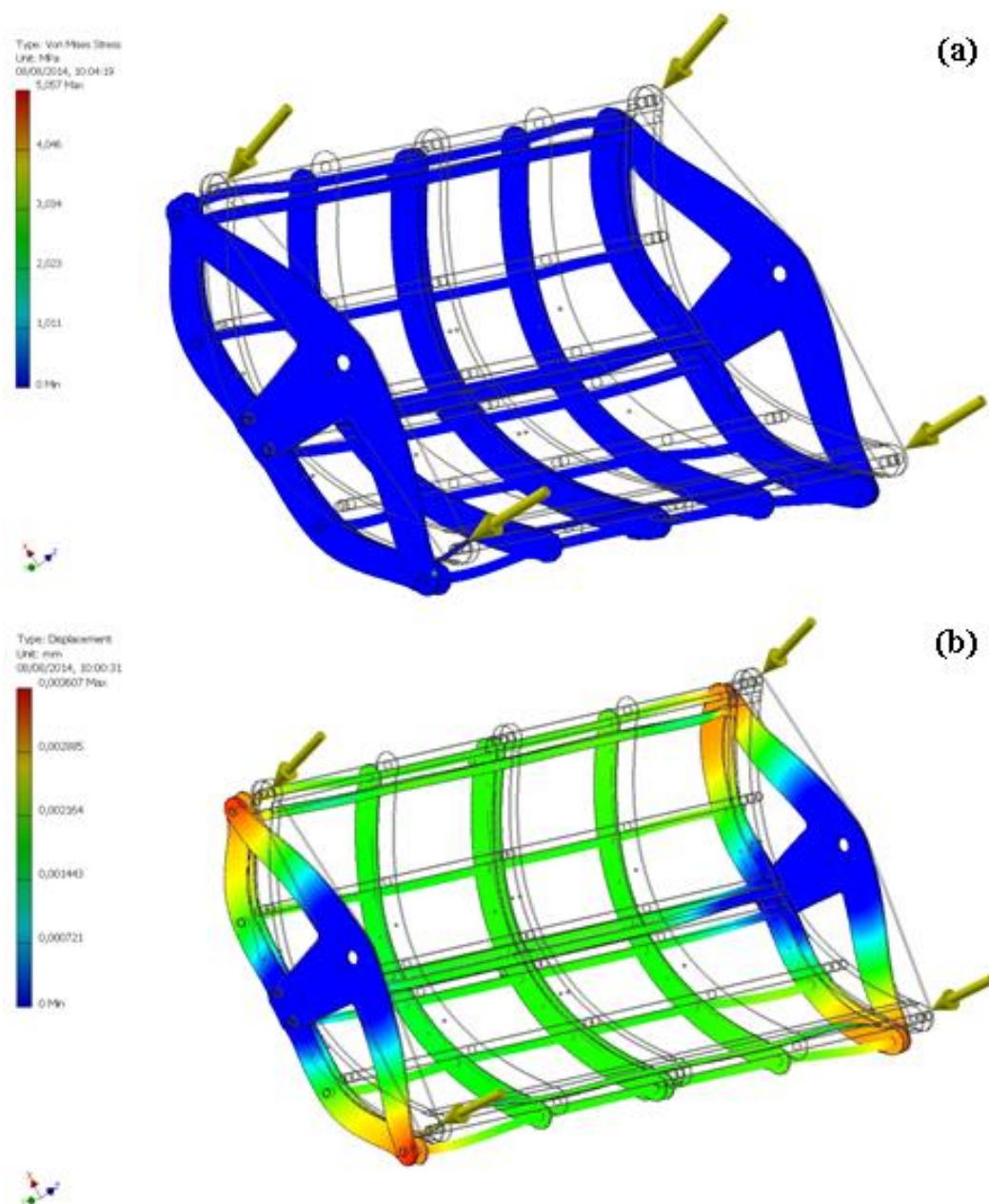
- Volume específico do ar (ρ) é 1,23 Kg/m³;
- Coeficiente de Arrasto para uma calha cilíndrica (C_d) perpendicular ao vento é 2,3;
- Área projetada do coletor (A) é de 2 m²;
- Velocidade do ar (v_∞) é de 15 m/s.

Com esses valores, tem-se:

$$F_D = 636 \text{ N}$$

Sabendo o valor da força, divide-se ela por 4, e com isso aplica-se este resultado em cada extremidade da estrutura, como mostrado na Figura 4.100. Após a simulação são analisados os dados de tensão e de deformação da estrutura. A partir dessa simulação e da análise da Figura 4.100 (a), que apresentou deformação máxima de 5,067 MPa, pode-se afirmar que a estrutura permanecerá íntegra e sem deformações plásticas, uma vez que as tensões presentes na estrutura são bem menores que a sua tensão de escoamento do aço, que é de 200 MPa. A partir da análise do gráfico de deformação Figura 4.100 (b), observa-se que a deformação máxima foi de 0,0036 mm. Essa deformação é bem pequena, de forma que não vem a comprometer as características óticas do coletor.

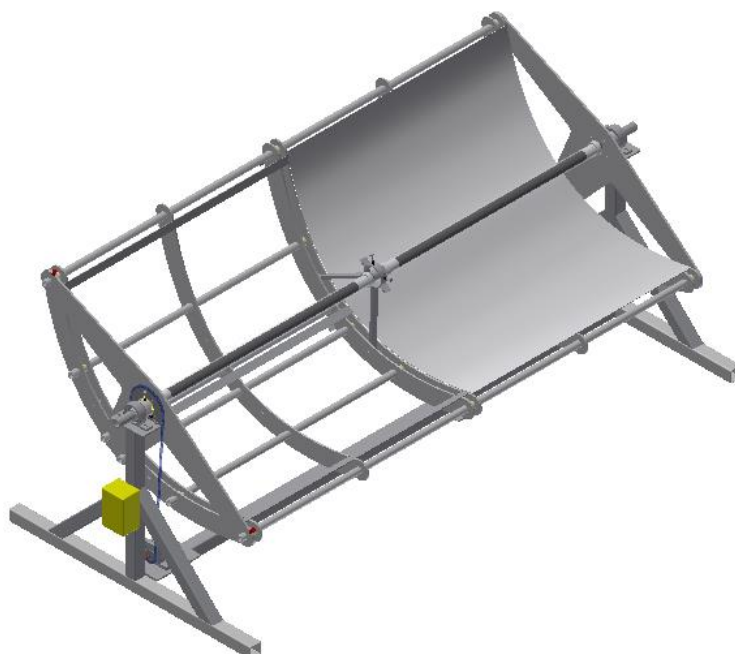
Figura 4.100 - Simulação de flexão na estrutura da superfície refletora utilizada no coletor solar cilíndrico parabólico – (a) análise de tensão e (b) análise de deformação.



Fonte: Autoria Própria

Para a análise da resposta da estrutura quanto aos esforços de torção, considera-se a pior situação, que seria a metade da carga total, atuando de apenas um lado do coletor, assim torcendo a estrutura. Essa situação seria experienciada, caso o coletor possuísse apenas uma de suas duas superfícies de reflexão, como mostrado na Figura 4.101.

Figura 4.101 - Condição imaginada para as análises de torção na estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria Própria

Com isso a simulação de torção consiste em pegar a metade da carga calculada na equação 4,18, dividir esse resultado por quatro e aplicar nas quatro extremidades do coletor, como mostrado na Figura 4.102.

Semelhante as análises realizadas para os esforços de flexão, como mostrado na Figura 4.102 (a), as análises de tensão de torção apresentam o valor máximo de 10,62 Mpa, que mostra que não haverá deformações permanentes na estrutura do coletor.

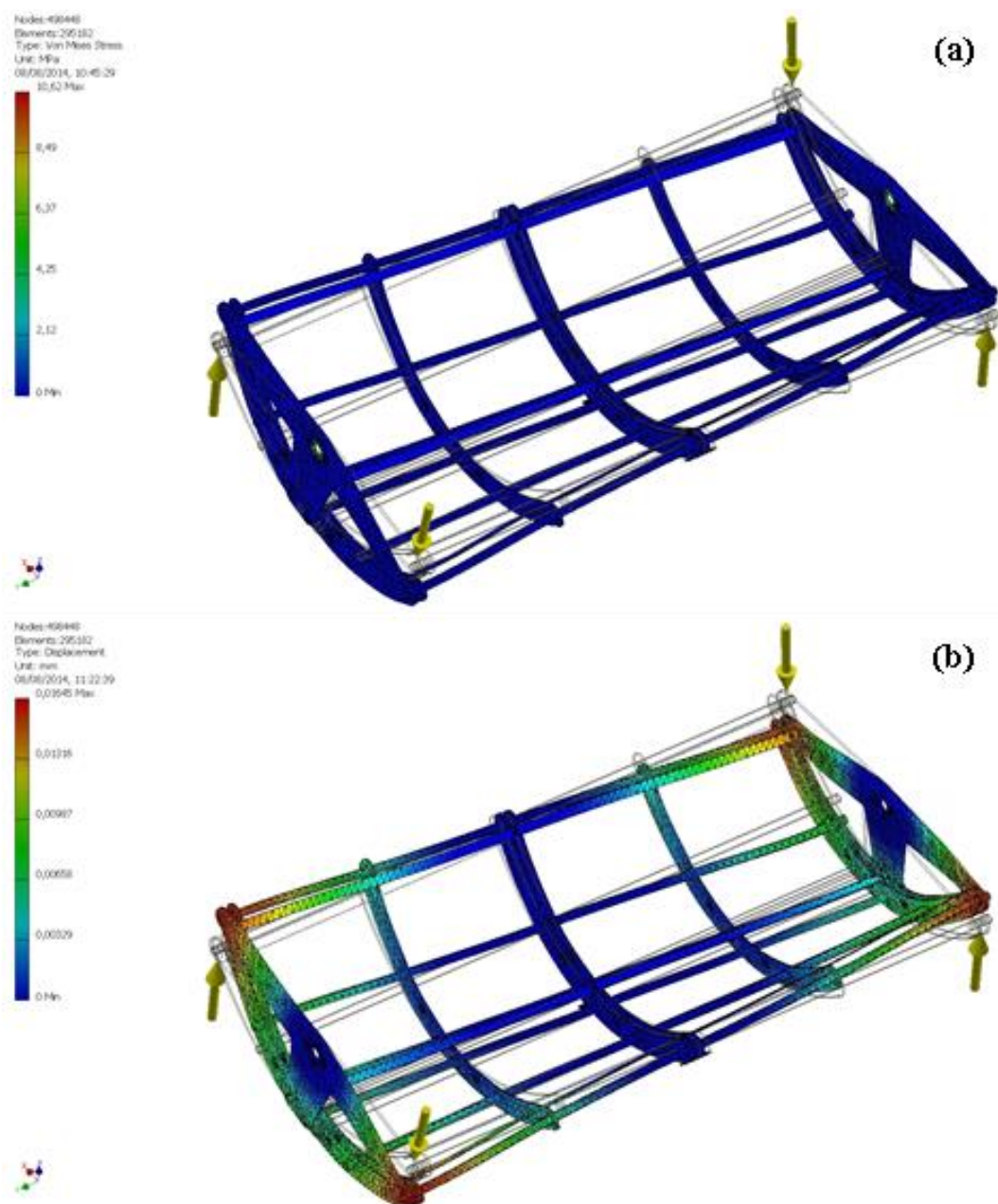
Analisando as deformações apresentadas na Figura 4.102 (b), que apresentam como deformação máxima o valor de 0,01645 mm, também mostra que não haverá deformações que venham a comprometer as características óticas do coletor.

Desta forma, finaliza-se as análises estruturais na estrutura da calha do coletor, ciente de que as dimensões e espaçamentos utilizados para o coletor são adequados as suas condições de operação.

Após essa análise estrutural, faz-se necessário também uma análise semelhante na Superfície de Reflexão, uma vez que essa superfície será a responsável por suportar todo o esforço de pressão que atuará sobre a estrutura. Uma vez que essa Superfície de Reflexão será uma chapa de aço inox, apoiada sobre chapas mais grossas, é razoável imaginar que essa pode sofrer deformações que venham a comprometer as características óticas do coletor.

A partir dessa constatação, foram realizadas sequências de simulações que tinham por objetivo, mapear o comportamento da Superfície de Reflexão para diversas velocidades de vento. Essas análises permitiriam mudanças nas disposições das costelas que compõem o coletor, a fim de minimizar possíveis deformações excessivas.

Figura 4.102 - Simulação de torção na estrutura da superfície refletora utilizada no coletor solar cilíndrico parabólico – (a) análise de tensão e (b) análise de deformação



Fonte: Autoria Própria

Para essas simulações foi utilizado o modelo proposto na Figura 4.103. Esse modelo apresenta seis constelas e permite determinar se as deformações geradas por cargas de vento irão gerar deformações que comprometerão as propriedades óticas do coletor.

Figura 4.103 - Modelo proposto para a simulação da folha de aço inox utilizada como Superfície Refletora



Fonte: Autoria Própria

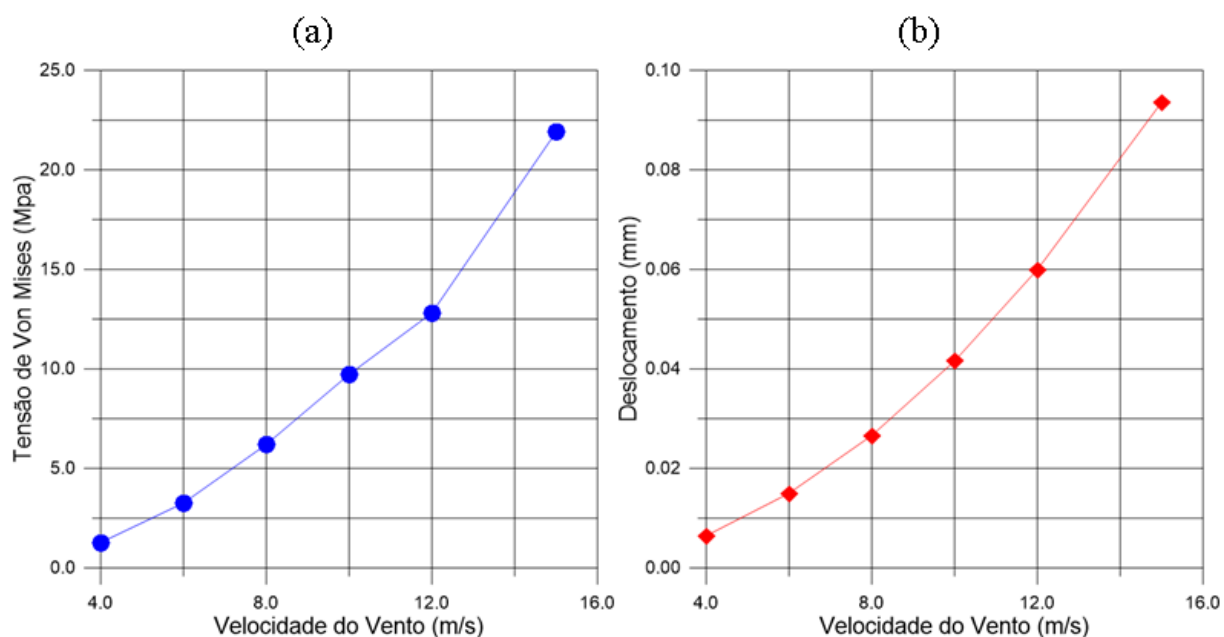
Contudo, para a realização dessas simulações, foram necessárias algumas considerações simplificadoras, como:

- Engastes nos furos dos tubos;
- Aproximação do espelho por uma casca, em função da dimensão da espessura em relação as demais da simulação;
- Carga aplicada na forma de pressão.

Implementando essas considerações, foram simuladas velocidades de vento de 4, 6, 8, 10, 12 e 15m/s. Os resultados dessa simulação, são mostrados na Figura 4.104.

Analisando os resultados obtidos na Figura 4.104, vê-se que a tensão máxima obtida é de 15 MPa , que está abaixo da tensão de escoamento do aço inox que é de 260 MPa. Observa-se também que todas as deformações são inferiores a 0,1 mm, podendo-se afirmar que não haverá perdas na qualidade do foco devido a essas deformações.

Figura 4.104 - Resultado das simulações (a) Tensão de Von Mises pela velocidade de vento (b) Deslocamento pela velocidade do vento

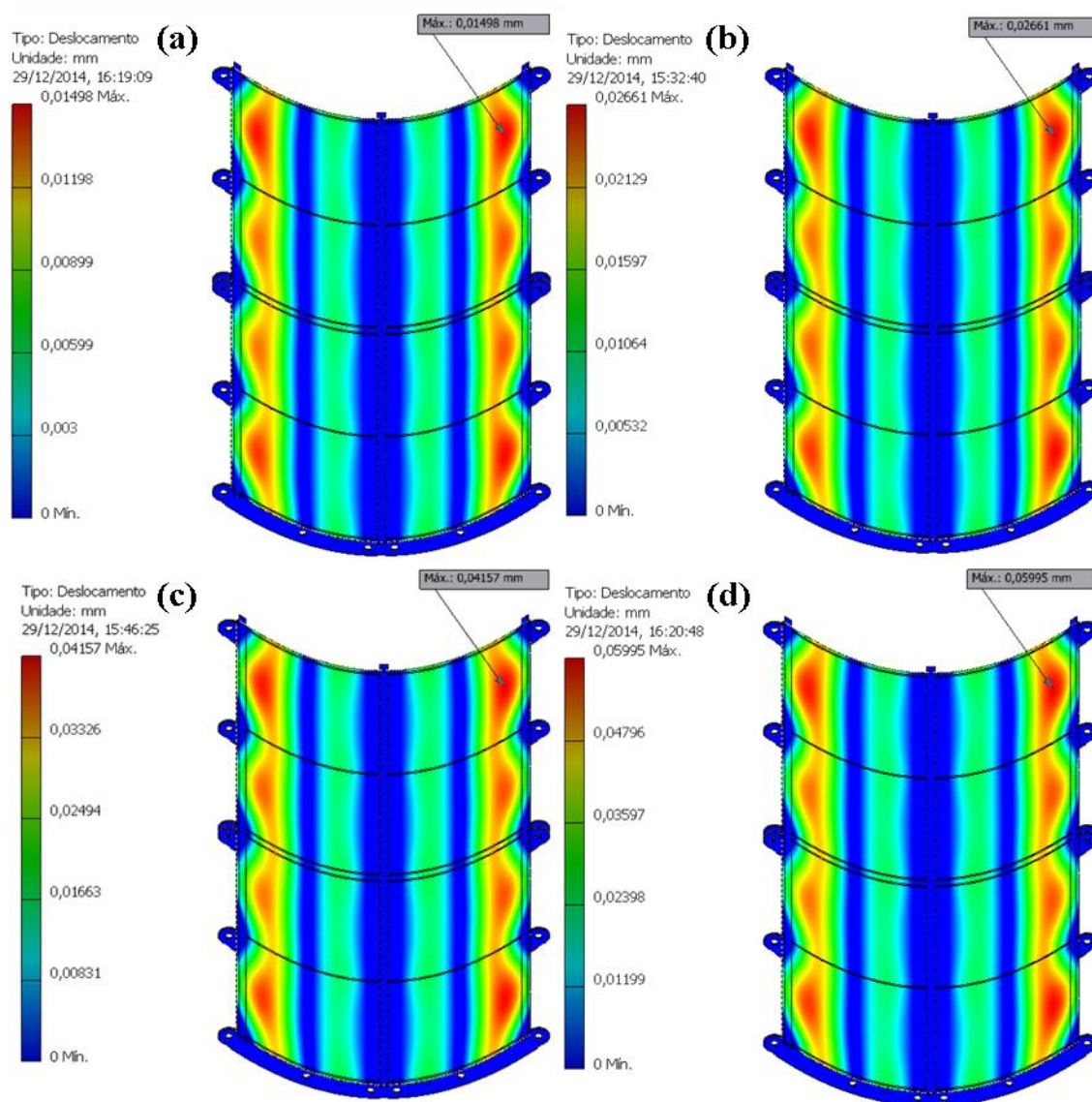


Fonte: Autoria própria

Mesmo não havendo necessidade de mudanças na disposição das costelas do coletor, é válida a análise dos locais onde ocorrem as maiores tensões e as maiores deformações.

Analisando a Figura 4.105 percebe-se que as maiores deformações estão nas áreas entre as costelas do coletor e nessa região, as maiores tensões se encontram mais próximas das extremidades do coletor. Assim caso fosse necessário a colação de mais pontos de apoio, essa seria a região que traria resultados mais significativos.

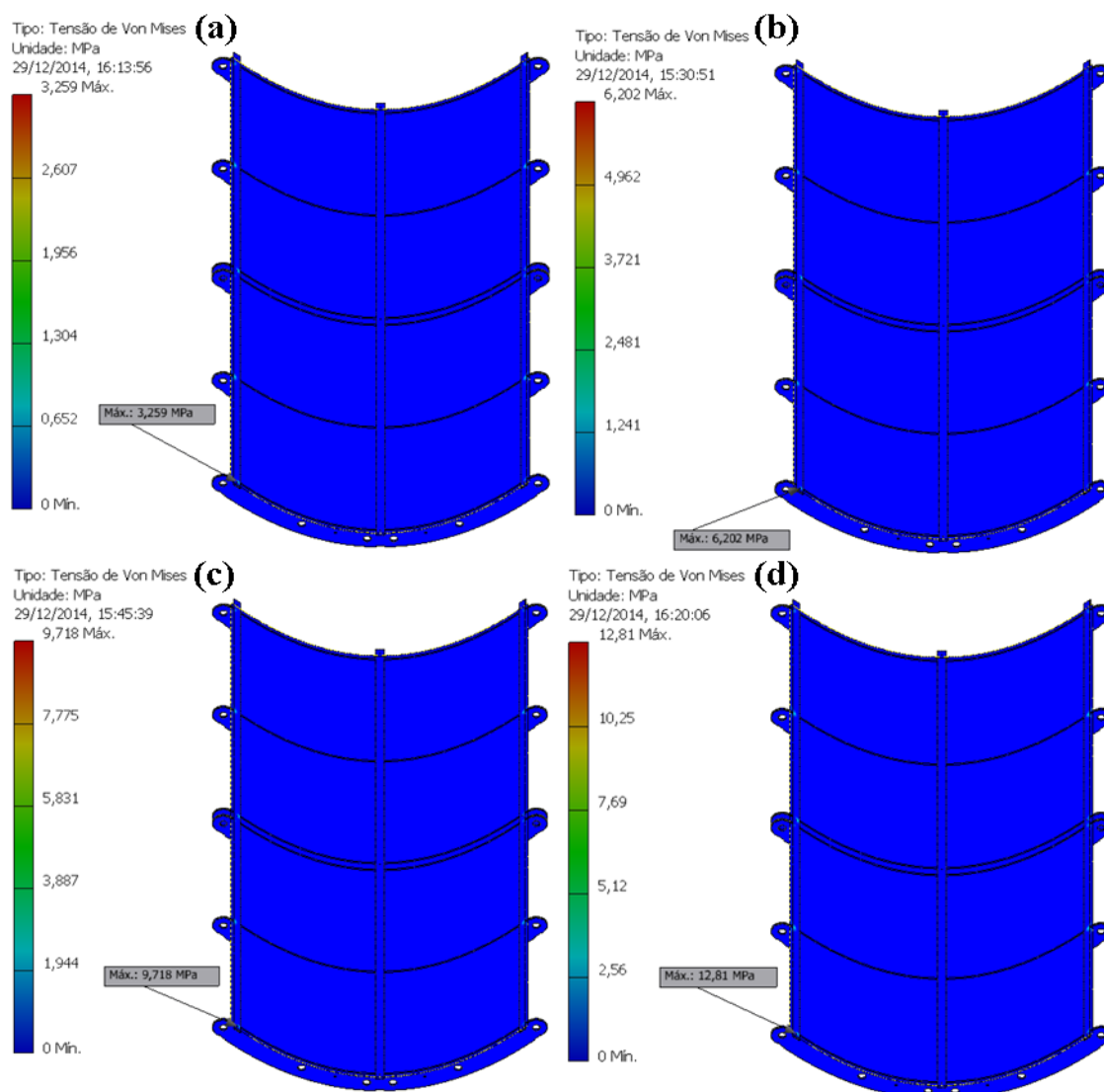
Figura 4.105 – Deformação pela velocidade de vento na folha metálica utilizada como Superfície de Reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico. (a) 6 m/s, (b) 8 m/s, (c) 10 m/s e (d) 12 m/s.



Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 4.106 que as maiores tensões não se encontram nos locais que apresentam uma maior deformação. Esse resultado está coerente com o tipo de carregamento distribuído aplicado sobre toda a superfície da folha metálica. As maiores tensões estão concentradas nas extremidades diagonais da folha metálica, pois a sua geometria forma uma quina que se apresenta como um concentrador de tensões.

Figura 4.106 - Tensão pela velocidade de vento na folha metálica utilizada como Superfície de Reflexão do coletor solar cilíndrico parabólico. (a) 6 m/s, (b) 8 m/s, (c) 10 m/s e (d) 12 m/s.



Fonte: Autoria Própria

Finalizada essas análises, chega-se ao fim do Projeto Preliminar da estrutura do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico.

Por fim, uma das necessidades do projeto é a fácil movimentação do Coletor, para isso foi escolhido um sistema de movimentação tipo rodízio, como mostrado na Figura 4.107.

Figura 4.107 - Sistema de movimentação utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Site: <https://mundodosparafusos.com.br/ferragens-rodizio-poliuretano-rodizio-colson-basgir-freio-50k-p-398.html>, acesso em: 28/07/2015

Foram utilizados 4 rodízios para a movimentação do coletor. Esses rodízios possuem freios que permitem travar o coletor no momento em que o mesmo for ser utilizados. Como o coletor apresenta um peso de 110 kg e tem que ser transportado nos mais diversos terrenos e durante esse transporte os rodízios é que devem suportar o peso do coletor, foram selecionados rodízios de 50 kg cada, como mostrado na Figura 4.108, permitindo um transporte seguro para o Coletor.

Figura 4.108 - Catalogo utilizado para a seleção do rodízio

INDUSTRIAL LEVE

INDUSTRIAL LIGHT / INDUSTRIAL LIVIANO

SÉRIE L

PLACA PLATE

ZI

Borracha Cinza - Núcleo de Ebonite (borracha dura)
 Grey Rubber - Hard Rubber Core
 Caucho Gris - Núcleo de Caucho Duro (Ebonita)

Gratuito Free
 Suave Soft
 Rígido Rigid
 Gratuito Free

Código / Code	mm	mm	kg	mm	mm	mm	mm	mm	kg	kg	
GL FL 210 ZIF	2"	50	22	50	66x49	52x24/35	7	72	24	0,261	0,197
GL FL 210 ZIX	2"	50	22	50	66x49	52x24/35	7	72	24	0,261	0,197
GL FL 310 ZIF	3"	75	22	60	66x49	52x24/35	7	99	25,5	0,344	0,271
GL FL 310 ZIX	3"	75	22	60	66x49	52x24/35	7	99	25,5	0,344	0,271
GL FL 410 ZIF	4"	100	22	70	66x49	52x24/35	7	120	38	0,400	0,290
GL FL 312 ZIF	3"	75	32	90	105x80	86/73x60/51	8	100	28	0,714	0,480
GL FL 312 ZIR	3"	75	32	90	105x80	86/73x60/51	8	100	28	0,750	0,516

Assim finaliza-se o Projeto Preliminar do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico.

4.4 Projeto detalhado

Essa é a etapa do projeto que tem por finalidade possibilitar a fabricação do protótipo. Para isso todo o projeto é colocado na forma de desenhos técnicos, onde deverão ser especificados todas as dimensões, tolerâncias, materiais e processos de fabricação, que garantirão o cumprimento dos requisitos e especificações gerados nas fases anteriores do projeto.

O presente projeto foi completamente documentado na forma de desenhos técnicos, uma vez que esse é um dos requisitos básicos para a próxima fase, que é a fabricação. No entanto esses desenhos não poderão ser aqui divulgados, pois são de propriedade da empresa.

4.5 Fabricação

Nesta etapa serão abordados as etapas de fabricação que tiveram por consequência o primeiro protótipo do coletor. Como se trata de um sistema eletromecânico, será feita uma divisão das etapas de fabricação das partes mecânicas e das placas eletrônicas que são o cérebro do sistema.

4.5.1 Fabricação mecânica

Após a finalização do Projeto Preliminar, que gerou todas as dimensões dos diversos subsistemas do coletor e a documentação desse projeto sob a forma de desenhos técnicos, teve-se início a fase de fabricação do protótipo do coletor solar.

Por se tratar de um sistema complexo, a fabricação teve que ser realizada por duas empresas, que por motivo de sigilo, não podem ter os seus nomes mencionados, a partir desse ponto referenciadas como “empresa A” e “empresa B”. A empresa A, responsável pelo corte dos perfis parabólicos e a empresa B, responsável pela usinagem das demais peças e pela montagem do coletor.

Como mencionado acima, a empresa A foi contratada para efetuar o corte das chapas a fim de se obter um perfil parabólico. Por se tratar de uma forma complexa, foi necessário a utilização de uma corte a plasma equipado com Comando Numérico Computadorizado (CNC)

de dois eixos, que realizou o corte dos perfis segundo a equação do perfil parabólico desejado. Uma máquina de corte semelhante é mostrada na Figura 4.109.

Figura 4.109 - Máquina de corte a plasma semelhante a utilizada no corte dos perfis parabólicos.



Fonte: Site: <http://www.baw.com.br/produtos/plasma/m%C3%A1quinas-de-corte-cnc/megacord.aspx> acesso em: 29/07/2015

Durante a etapa de fabricação na empresa A, foram feitas diversas análises, junto aos engenheiros dessa empresa, a fim de otimizar as dimensões originalmente selecionadas, bem como para determinar quais seriam os melhores parâmetros para o corte das diferentes espessuras de chapas, utilizadas na fabricação do coletor.

Após o corte foram obtidos vários perfis, como mostrados na Figura 4.110. Esses perfis foram a base para a fabricação do coletor solar.

Foram acompanhados todos os cortes e após o seu término, foram realizadas diversas medidas a fim de verificar se as peças obtidas estavam de acordo com o desenho técnico entregue a empresa.

Verificando que todas as peças da empresa A estavam conformes, essas foram entregues a empresa B e teve início a segunda fase da fabricação do coletor. Como fora comentado anteriormente, toda a fabricação realizada pela empresa B, foi acompanhada pelo mestrando, tanto para corrigir possíveis desvios, como para dominar a fabricação do equipamento. A partir de agora são descritos algumas etapas da fabricação do coletor solar.

Figura 4.110 - Perfis obtidos no corte a laser.



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 4.111 é apresentada a etapa de facimento do suporte lateral do coletor. Essa ainda passou por diversos processos como sangramento e furação, de maneira que pudesse ser fixada na estrutura e ser utilizada como apoio de giro para o coletor.

Figura 4.111 - Fabricação do suporte lateral do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria própria

Figura 4.112 - Extremidade do tubo absorvedor acoplado a um tubo para conexão a tubulação do sistema de aquecimento.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 4.112, observa-se uma das extremidades do tubo coletor, já finalizada, após o acoplamento com um tubo de conexão. Essa conexão foi realizada sob interferência e foi executada com auxílio de um prensa hidráulica. A escolha desse tipo de ajuste se deve a necessidade de estanqueidade nessa conexão e a dificuldade de se utilizar a soldagem, pois se tratam de dois materiais distintos.

Contudo, no segundo acoplamento, foi observado uma deformação plástica no tubo preto, como mostrado na Figura 4.112. Após análise, foi diagnosticado que essa deformação ocorria devido a elevada tensão exercida na parede do tubo durante o acoplamento. Dessa forma foi abandonado o acoplamento sob interferência e decidiu-se utilizar um acoplamento roscado para acoplar esses dois componentes. Para resolver o problema da vedação foi utilizado uma fita de politetrafluoretileno, também conhecido como “veda-rosca”, em todos os acoplamentos

de tubos e as extremidades do Tubo Absorvedor. A Figura 4.113 mostra a montagem do Tubo Absorvedor, ainda sem o tubo de vidro externo.

Figura 4.113 - Montagem do tubo absorvedor



Fonte: Autoria Própria

A Figura 4.114 mostra a estrutura do Coletor pronta. Pela figura observa-se que a estrutura recebeu uma pintura protetora com tetróxido de chumbo, também conhecido como zarcão.

A estrutura mencionada acima, foi formada a partir da união de diversos perfis parabólicos, conectados por tubos, que tem por função conferir alta rigidez a estrutura. Observa-se também a montagem do atuador acoplado à estrutura por meio de uma transmissão por corrente.

Figura 4.114 - Montagem da estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria Própria

A fase do projeto do protótipo estava então finalizada. Foram realizadas diversas análises de conformidade e de acordo com o obtido, foi possível verificar que todos os requisitos listados pela empresa Suna Engenharia foram atendidos.

Na Figura 4.115 vê-se o coletor após a finalização do seu processo de fabricação. Como pode ser observado, foi fixado a Superfície de Reflexão a estrutura. Para a sua fixação foram utilizados rebites de alumínio. Foram fixados também os rodízios, bem como colocado o Tubo Absorvedor.

Após as etapas de fabricação, por comum acordo entre a Suna Engenharia e o Laboratório de Projetos e Instrumentos (LPI), o coletor solar ficou em exposição por 3 meses no hall em frente ao LPI, localizado no departamento de Engenharia Mecânica na UFCG.

Na Figura 4.115 observa-se que o tubo absorvedor não está recoberto por um tubo de vidro. Isso ocorreu por que preferiu-se retirar esse tubo, uma vez que o protótipo ficaria em exposição.

Figura 4.115 - 1º Protótipo do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

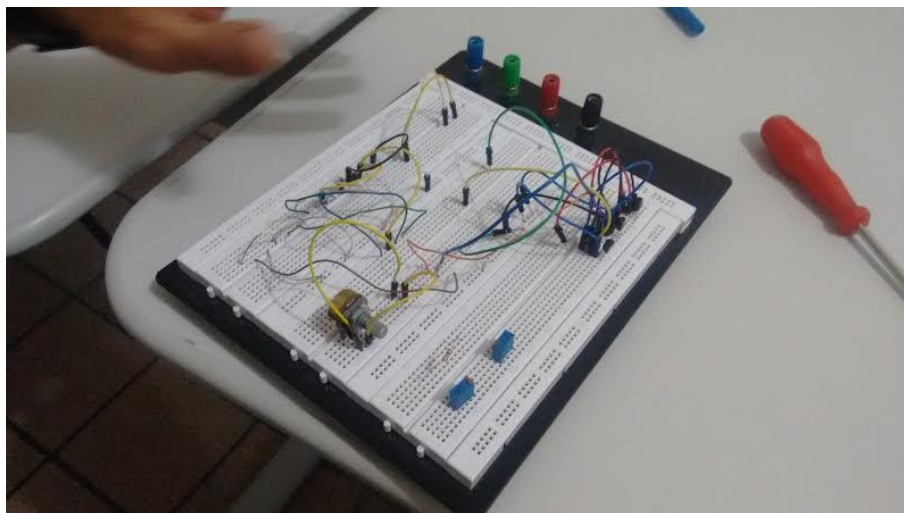
4.5.2 Fabricação da instrumentação desenvolvida

A instrumentação eletrônica desenvolvida junto à Suna Engenharia pode ser dividida em duas. Uma eletrônica de operação que será acoplada a parte mecânica e será o cérebro do sistema, e uma outra eletrônica, mais simples, cujo o objetivo foi apenas os testes dos subsistemas. Essa instrumentação será discutida abaixo.

Deve-se mencionar que toda a eletrônica utilizada foi desenvolvida para esse trabalho, não tendo sido utilizado equipamentos de aquisição padrões comerciais.

Antes de serem fabricadas, todas as placas foram projetadas e testadas em protoboard, como mostrada na Figura 4.116. A utilização dessa placa de testes possui diversas vantagens, dentre elas a possibilidade de correção de possíveis desvios antes da corrosão ou da soldagem em placa perfurada, bem como a possibilidade de testes em separado para cada circuito que compõe a placa.

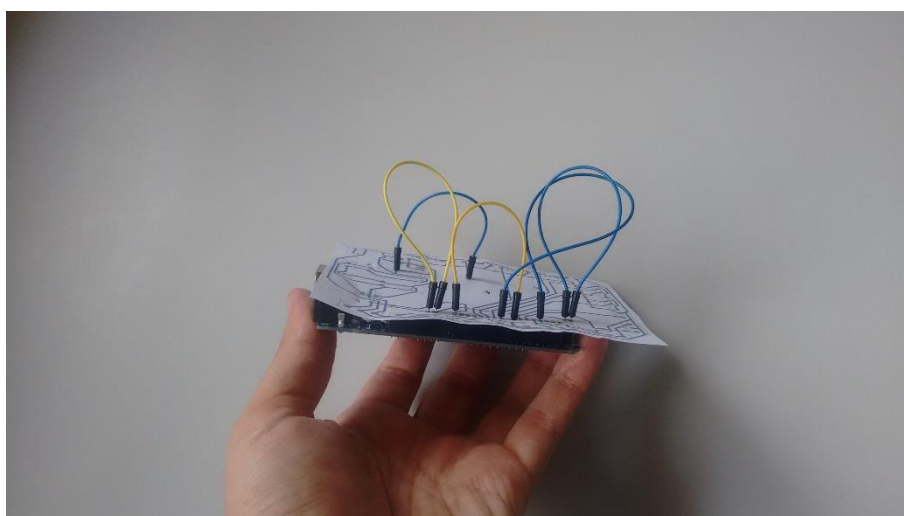
Figura 4.116 - Teste do circuito de aquisição de temperatura na Protoboard.



Fonte: Autoria própria

A Figura 4.117 mostra um teste de encaixe entre a placa e o Arduino. Assim como esse, todos os demais circuitos foram projetados e desenhados em software apropriado que permite uma otimização nas trilhas do circuito. Uma vez finalizado, o mesmo é impresso e são testados todos os componentes.

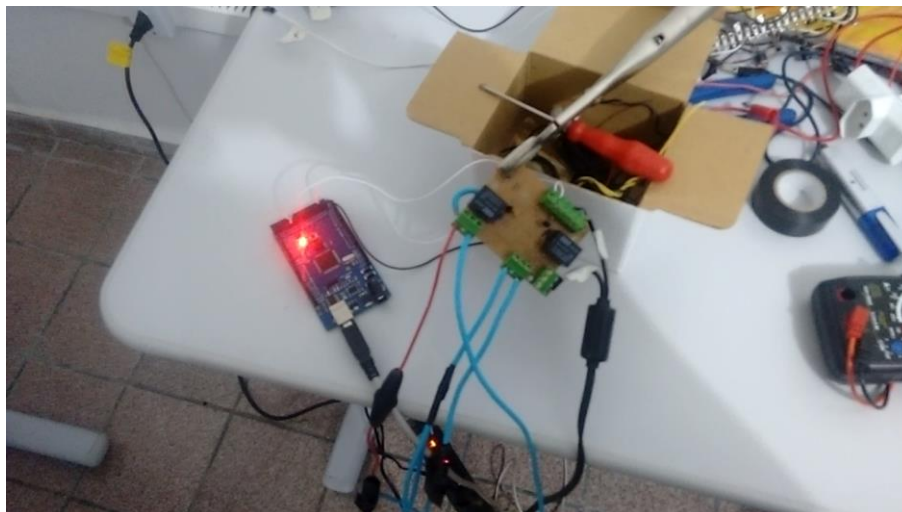
Figura 4.117 - Desenvolvimento de aquisição de dados do coletor solar cilíndrico parabólico.



Fonte: Autoria própria

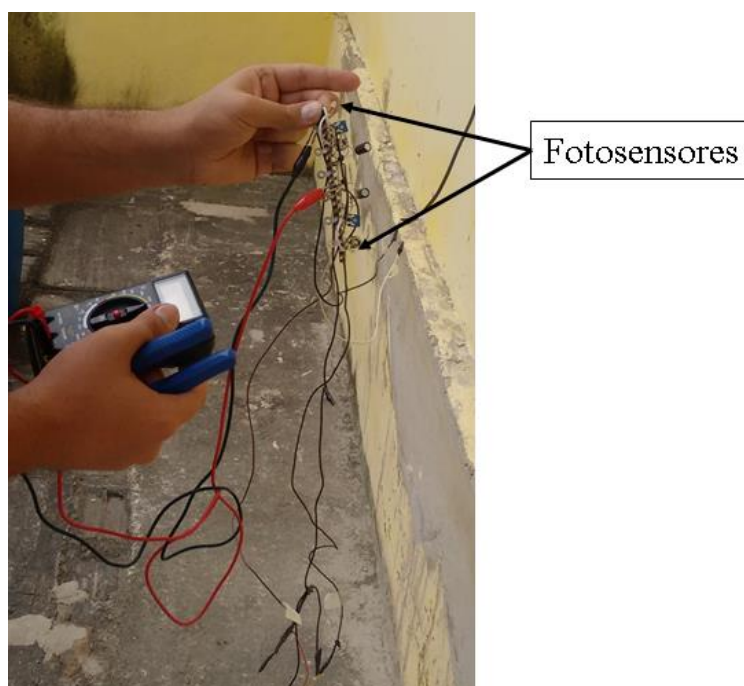
A partir dessa metodologia para a confecção de placas, foi possível o projeto de todos os sistemas de testes e aquisições. Um dos sistemas é mostrado na Figura 4.118, sendo este utilizado para realização dos testes de estresse do motor.

Figura 4.118 - Sistema de comutação de giro.



Fonte: Autoria própria

Figura 4.119 -Sensor para controle de posição do coletor solar cilíndrico parabólico



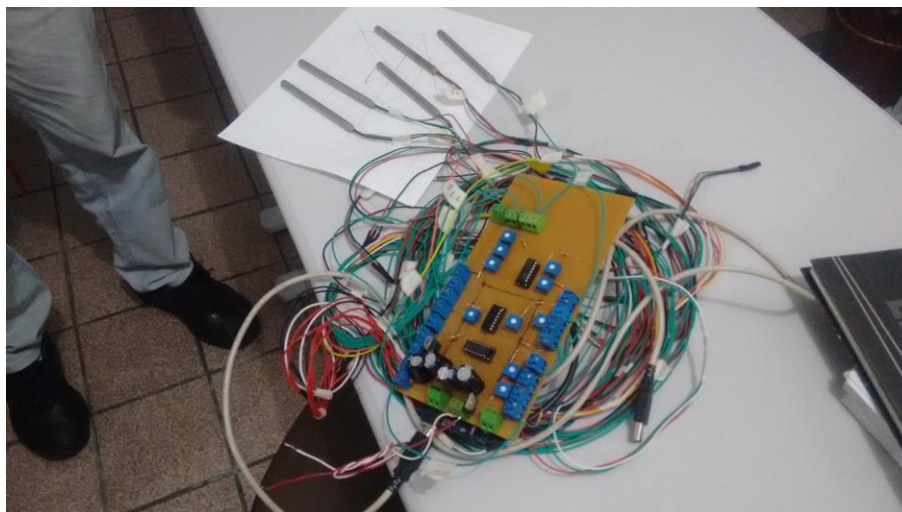
Fonte: Autoria própria

Foi desenvolvido também um sensor de posicionamento, como mostrado na Figura 4.119, responsável pela medição de inclinação do coletor com relação a horizontal.

Outro projeto, foi o sistema de aquisição realizado foi a placa de aquisição de dados de temperatura e vazão do sistema. Essa placa está mostrada na Figura 4.120 e permitirá a aquisição de temperatura em 10 pontos do coletor e a aquisição da vazão. Essa placa conectada ao Arduino e a um computador permitiu a aquisição e armazenamento de todos os dados de interesse na frequência mais conveniente para o teste.

Por último, o sistema de medição de temperatura e vazão foi acoplado a uma unidade de processamento chamada de Raspberry Pi, que é responsável por armazenar os dados lidos e que futuramente possibilitará que esses dados possam ser enviados via internet, permitindo assim um acompanhamento em tempo real da operação do Coletor Solar. Esse sistema de armazenamento é mostrado na Figura 4.121.

Figura 4.120 - Placa de aquisição de temperaturas e vazão utilizada nos testes de campo do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.121 - Sistema de aquisição e armazenamento dos dados de temperaturas e vazão



Fonte: Autoria própria

Assim finaliza-se a etapa de fabricação do coletor solar cilíndrico parabólico.

Entretanto, como um dia disse Helmuth von Moltke, “Nenhum plano de batalha sobrevive ao contato com o inimigo”. Igualmente os projetos geralmente precisam de alguns ajustes após a primeira fabricação. Esses ajustes serão mostrados no próximo tópico.

4.6 Testes

Após a fabricação do protótipo foi necessário a execução de alguns testes com o objetivo de atestar o correto funcionamento do sistema, quanto ao que havia sido inicialmente especificado no Projeto Informacional. Essa etapa é composta por dois tipos de testes, os testes dos subsistemas em separado e os testes de campo.

A principal dificuldade encontrada nesse trabalho foi a correta seleção do atuador do sistema de controle. Essa dificuldade advém das baixas rotações impostas pelo sistema. Rotações essas que em sistemas de grande porte, são obtidas por motores especiais com controle de rotação e reduções de velocidade da ordem de 9000:1. Contudo, mantendo o objetivo de

proporcionar um controle adequado para o coletor foram feitos diversos testes para se identificar uma configuração mais adequada.

Nesse tópico será utilizada uma exposição cronológica dos dados, pois o autor julga esta mais efetiva à compreensão do leitor.

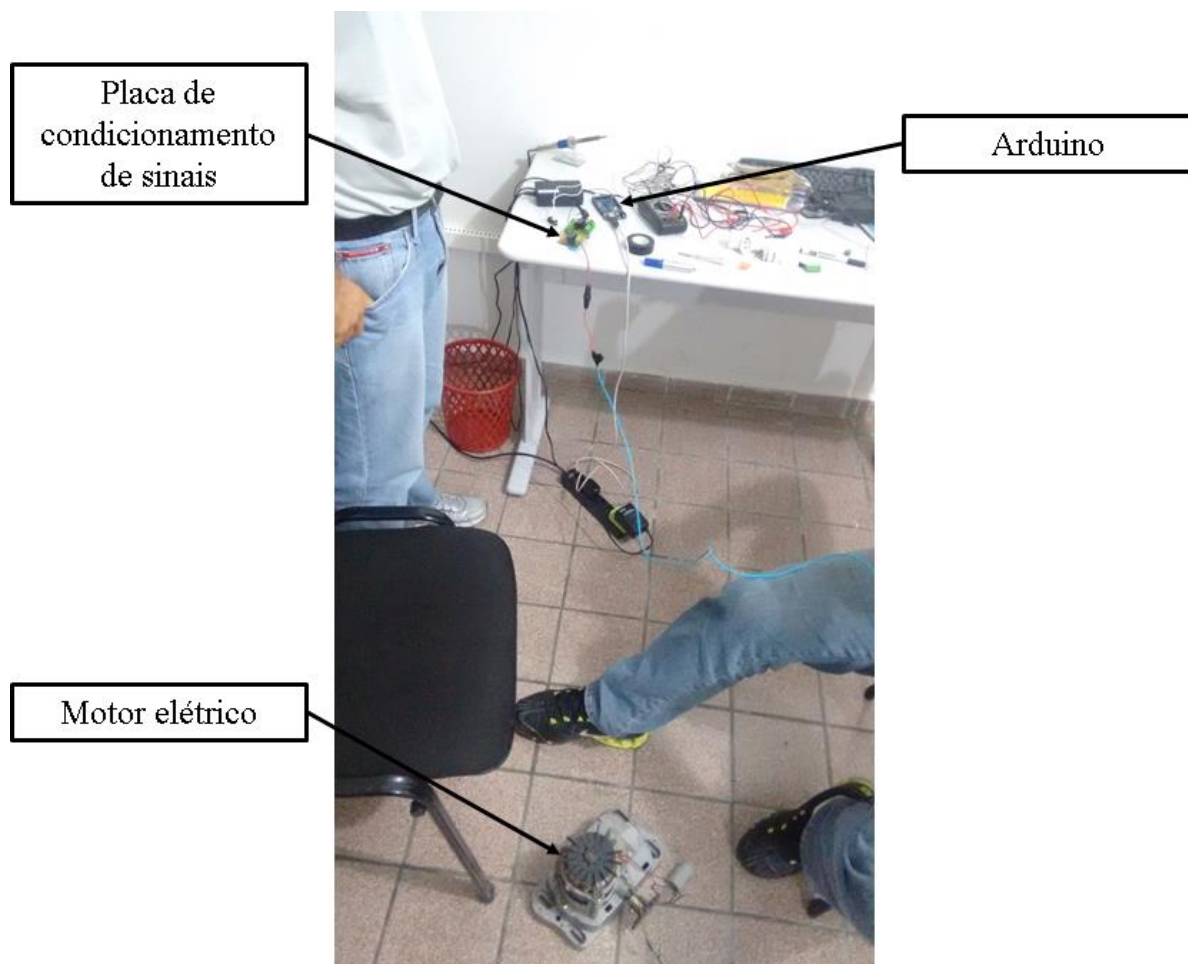
4.6.1 1º TESTE – Motor de Portão

Como mencionado na etapa de Projeto Preliminar, a primeira solução proposta para o atuador foi um motor elétrico utilizado para a abertura e fechamento de portões. Esse motor entrega potência a um sistema de coroa e parafuso sem-fim, que transmite para um pinhão localizado na ponta do eixo do motor e que por sua vez transfere essa potência para a cremalheira do portão, gerando assim o seu deslocamento.

Contudo havia a desconfiança de que esse tipo de motor não suportasse as condições de trabalho requeridas pelo coletor, que era caracterizada por acionamentos constantes e tempo de operação curto. Essa desconfiança foi gerada pelo relatos de diversas pessoas, as quais comentamos sobre a ideia, informavam que esse tipo de motores eram constantemente substituídos nas garagens dos prédios onde essas pessoas residiam. Mesmo assim foi feito um teste de estresse do motor.

O teste consistia em submeter o motor a repetidas atuações por um tempo de 3 segundos, com intervalos de 3 segundos entre uma atuação e outra. Para cada atuação, a subsequente apresentava um sentido de giro diferente da anterior. Para isso foi utilizado o sistema de comutação de giro mostrado na fase de fabricação do protótipo. A montagem do teste é mostrado na Figura 4.122, onde é apresentado a placa de condicionamento de sinais, que traduz os comandos enviados pelo arduino para que ele possa ser executado pelo motor. Dentro do arduino foi programado o comando anteriormente mencionado, de atuação e parada do motor.

Figura 4.122 - Teste de estresse realizado no motor de portão



Fonte: Autoria própria

O teste apresentado na Figura 4.122 foi executado durante 11 minutos. Após esse período percebeu-se que um dos circuitos do motor (aquele responsável pelo giro no sentido horário) havia entrado em curto e então o motor só estava girando para o sentido anti-horário.

Após esse incidente, foi feita uma busca na internet e constatado que a maneira correta de utilizar esse motor é com acionamentos contínuos e com grande espaçamento de tempo entre eles. Justamente o oposto do que era requisitado para o controle do coletor. Esse comportamento foi atribuído ao tipo de enrolamentos apresentados pelo motor, que utilizava fios de alumínio, que apresenta uma resistência a fadiga térmica bem menor que o cobre, material do qual são fabricados os fios da maioria dos motores elétricos. Dessa forma foi abandonada a ideia de utilizar o motor de portão elétrico.

4.5.2 2º TESTE – Utilização de um motor de para-brisa

A escolha desse tipo de motor ocorreu pelo fato dele apresentar as seguintes características:

- Alto torque;
- Baixa Rotação;
- Auto travante;
- Por ser de corrente contínua, permite um controle de rotação mais barato que um motor trifásico.

Mesmo esse sendo de corrente contínua, a vantagem de permitir um melhor controle de rotação, o qualificou como um candidato a atuador do sistema de controle do coletor. Além de ser de fácil aquisição e de apresentar um baixo custo. O motor utilizado é mostrado na Figura 4.123.

Figura 4.123 - Motor de para-brisa utilizado testado como possível atuador do sistema de controle



Fonte: Autoria própria

Entretanto, após os testes de torque, foi verificado que o torque na saída do eixo, não atendia ao torque necessário para o coletor, assim declinou-se da escolha desse motor como atuador.

4.5.3 3º TESTE – Motoredutor

Os testes anteriores foram muito importantes, pois cada um deles incrementou no conhecimento do sistema de movimentação do coletor. No primeiro caso ficou a lição de utilizar motores com enrolamento de cobre (ou que suportem elevado estresse térmico) e no segundo a escolha de um motor que tenha um torque suficiente para movimentar o coletor.

Com esses dois aprendizados, selecionou-se o motoredutor apresentado na Figura 4.124. Após testes foi verificado que o motoredutor apresentava um torque adequado, embora a sua rotação de 42 rpm, o que era muito alta para a correção do posicionamento do coletor.

Figura 4.124 - Motoredutor utilizado no sistema de controle do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Com objetivo de reduzir a rotação na saída do motoredutor, teve-se a ideia de acoplar um novo redutor. Esse redutor é mostrado na Figura 4.125. Ele apresenta uma redução de 20:1, de maneira que agora o sistema passasse a apresentar uma rotação de saída de 2,1 rpm.

Figura 4.125 - Redutor de velocidade utilizado no sistema de atuação do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

A montagem do sistema está mostrada na Figura 4.126. Mesmo não apresentando a velocidade de rotação compatível com às necessárias para o sistema de rastreamento, foi dado início aos testes do motor acoplado no coletor, com objetivo de testar o sistema de rastreamento solar exposto ao Sol.

Figura 4.126 - Montagem do motorreductor acoplado a reductor externo



Fonte: Autoria própria.

Contudo, no início dos testes com o coletor, foi percebido que o motor selecionado não possuía torque suficiente para rotacioná-lo. Inicialmente não foi bem compreendido tanta exigência por torque. Após algumas análises chegou-se a conclusão que o coletor apresentava um torque resistivo que variava de acordo com a sua angulação. A fim de evitar o erro cometido nas duas escolhas anteriores, foi pensado num sistema que permitiria medir com razoável precisão o torque necessário para rotacionar o coletor.

A solução utilizada para a estimativa do torque foi uma balança de mola tensionando a extremidade do coletor, como mostrado na Figura 4.127. A partir desse experimento foi medido a força aplicada na balança e o braço entre o ponto de aplicação da força e o centro de giro do coletor. Com isso chegou-se a um torque de $\sim 100\text{N.m}$.

Figura 4.127 - Teste para a estimativa do torque necessário para a movimentação do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria Própria

A partir da determinação do torque necessário para a movimentação do coletor, foi decidido que a aquisição de um motor que proporcionasse esse torque iria onerar o projeto, assim decidiu-se por colocar o seu centro de giro coincidente com o seu centro de massa.

Vale salientar que durante a fase de Projeto Conceitual não foi escolhido a colocação do centro de giro coincidente com o centro de massa porque queria-se evitar a utilização de tubos flexíveis no coletor. A utilização desses tubos onera o projeto e eleva a necessidade de

manutenções, uma vez que esse tubos são fontes de vazamentos, além de apresentar uma degradação mais acelerada que o restante da tubulação, devido a constante exposição a radiação solar.

As mudanças do centro de rotação do coletor são apresentadas em sequência na Figura 4.128.

Figura 4.128 - Sequência utilizada para a mudança do centro de giro do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Após essa mudança houve uma grande redução do torque necessário, sendo assim possível a realização dos testes do sistema de rastreamento do coletor.

Como era o esperado, o sistema de rastreamento se mostrou instável, muitas vezes não conseguindo encontrar o seu ponto de estabilidade. Essa instabilidade no sistema foi atribuída a elevada velocidade de rotação apresentada pelo atuador, o que causava um tempo muito pequeno de atuação, impossibilitando a predição na movimentação do motor.

A fim de resolver esse problema, foi acoplado um terceiro redutor no motor, como mostrado na Figura 4.129. Esse terceiro redutor apresenta uma redução de 20:1, dessa maneira o novo sistema apresenta uma rotação na saída do eixo de 0,1 rpm. Contudo a relação de

transmissão do pinhão para a coroa é de 3:1, assim a rotação que chegará ao coletor é de 0,033 rpm, que é uma rotação compatível com o ajuste necessário para a correção de posição do coletor.

Figura 4.129 - Atuador utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

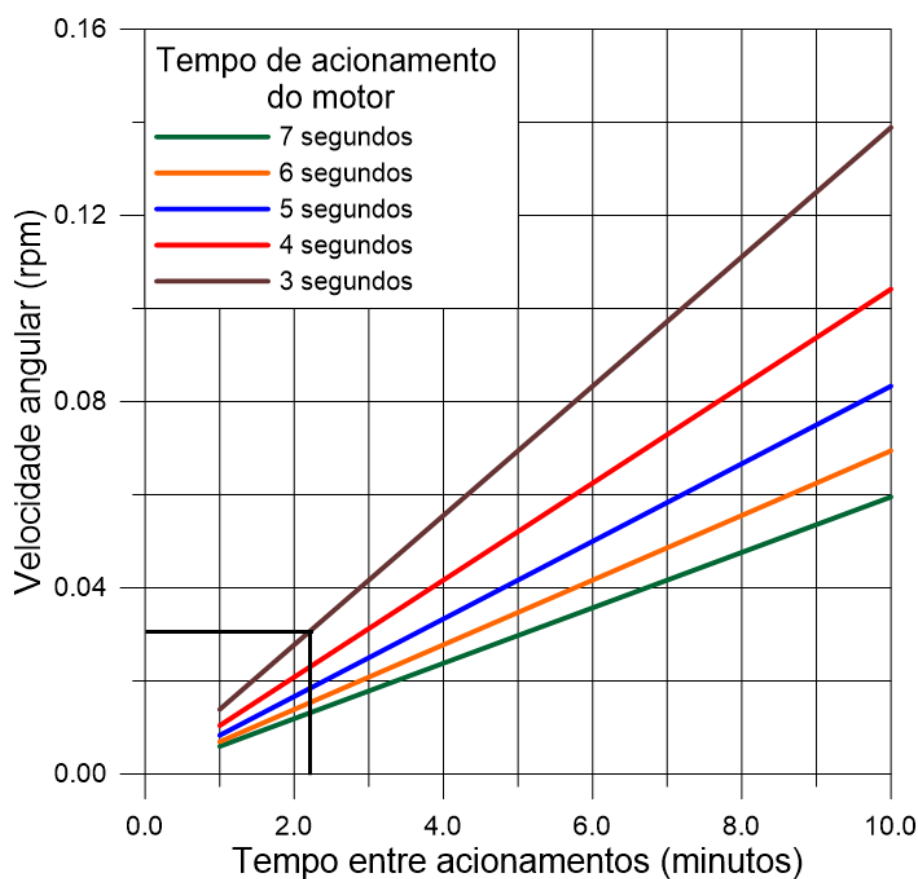
Conseguida uma velocidade adequada para a correção no posicionamento do coletor, utiliza-se a tabela apresentada no Projeto Preliminar e mostrada na Figura 4.98.

A partir desse gráfico, traça-se uma linha paralela ao eixo x com valor igual a velocidade de rotação do sistema (0,033 rpm). No ponto em que ela toca a linha marrom, traça-se uma nova linha paralela ao eixo y até tocar o eixo x. Nesse ponto encontramos o tempo que o motor ficará parado entre um acionamento e o acionamento seguinte.

Para a situação apresentada na Figura 4.130 é selecionado um tempo de acionamento do motor de 3 segundos (superior a 2 segundos), e com isso chega-se ao tempo entre acionamentos de aproximadamente 2,2 minutos, que deve ser utilizado nos primeiros testes do coletor Solar.

No gráfico apresentado na Figura 4.130 foram traçadas outras curvas para o caso de o tempo de acionamento de 3 segundos estiver trazendo instabilidade ao sistema. Assim também pode-se utilizar esse gráfico para a determinação dos parâmetros de rastreamento do Coletor Solar para os tempos de acionamento de 4, 5, 6 e 7 segundos.

Figura 4.130 – Seleção do atuador do sistema de controle utilizado no coletor solar cilíndrico parabólico



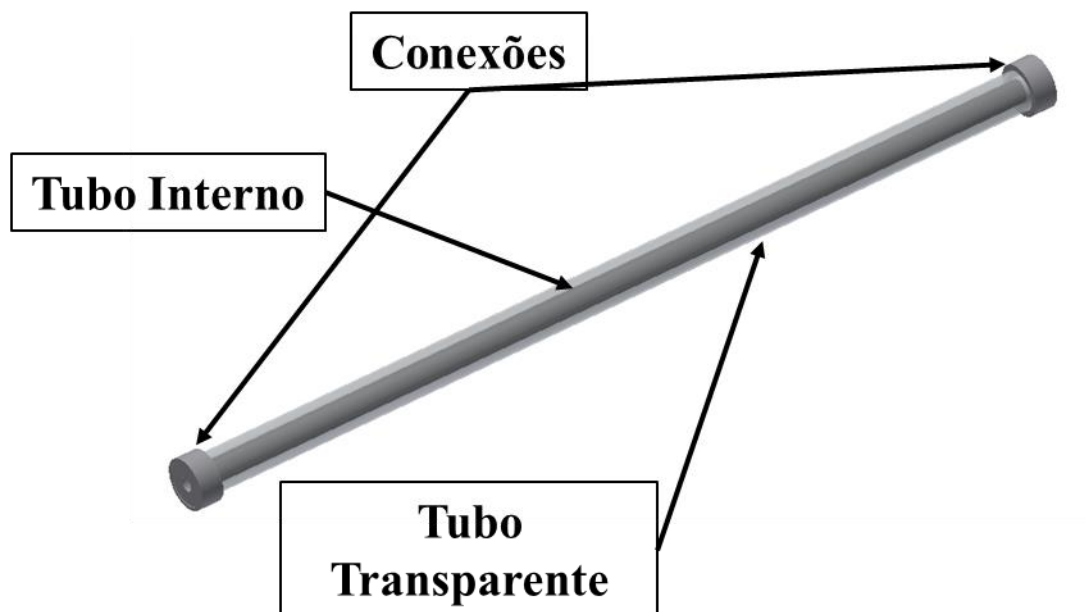
Fonte: Autoria própria

4.5.4 Re-projeto do tubo absorvedor

Devido a mudança do eixo de giro do coletor, foi necessário modificar o projeto do Tubo Absorvedor, bem como pela instabilidade surgida em sua fixação. Instabilidade essa que poderia levar a quebra do tubo de vidro colocado externo ao coletor.

Dessa forma foi pensado em um tubo menor e de fabricação mais fácil (devido o aprendizado adquirido com o projeto do tubo anterior) e que fosse mais fácil de instalar. A partir dessas necessidades, foi gerado o conceito apresentado na Figura 4.131.

Figura 4.131 - Conceito do novo tubo absorvedor do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

A partir do conceito gerado, foram feitas novamente todas as considerações necessárias para o Projeto Preliminar do tubo, que não será mostrado aqui por guardar muita semelhança com o projeto antigo.

A partir do Projeto Preliminar, foi dado início a uma nova etapa de fabricação para esse subsistema. O processo de fabricação é mostrado na Figura 4.132.

Finalizado o projeto do tubo absorvedor o sistema está pronto para testes. A configuração final do sistema montado está mostrado na Figura 4.133.

Figura 4.132 - Processo de fabricação do novo Tubo Absorvedor do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

4.5.5 Testes de campo do coletor solar cilíndrico parabólico

Os testes de campo do Coletor Solar foram realizados nas dependências da Suna Engenharia. Esses testes foram realizados no período de 10:00:00 as 12:30:00, o que totaliza 2 horas e 30 minutos de testes. Não foram feitos testes mais longos devido ao sombreamento do local de testes após as 12:30:00.

A Figura 4.133 mostra o sistema montado (ainda sem os tubos absorvedores) para o teste de campo.

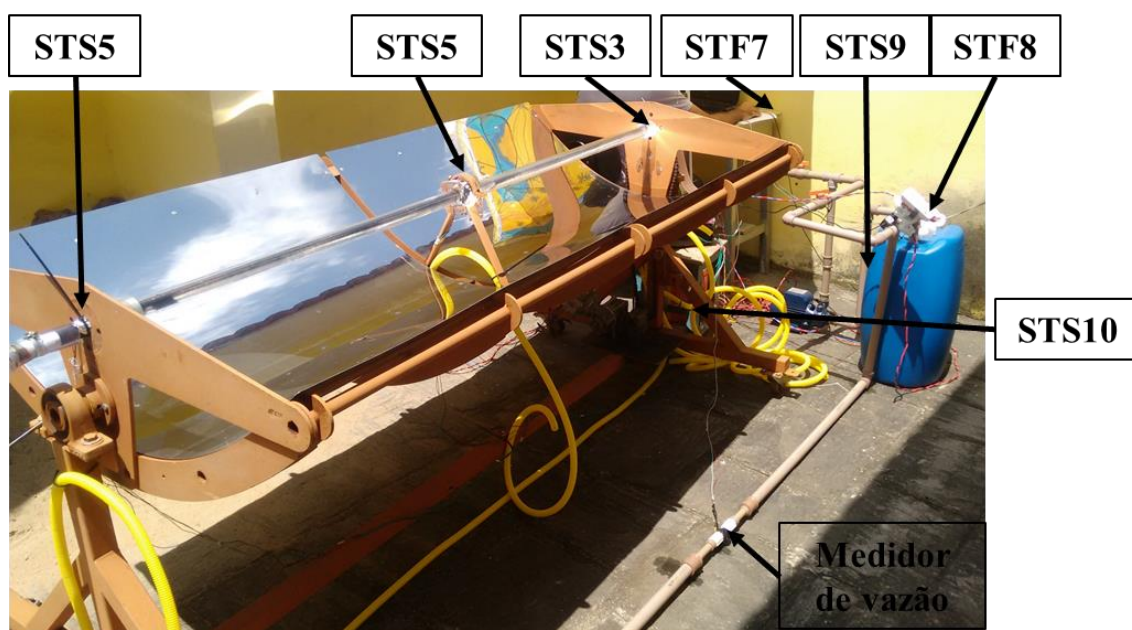
Figura 4.133 - Sistema para teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

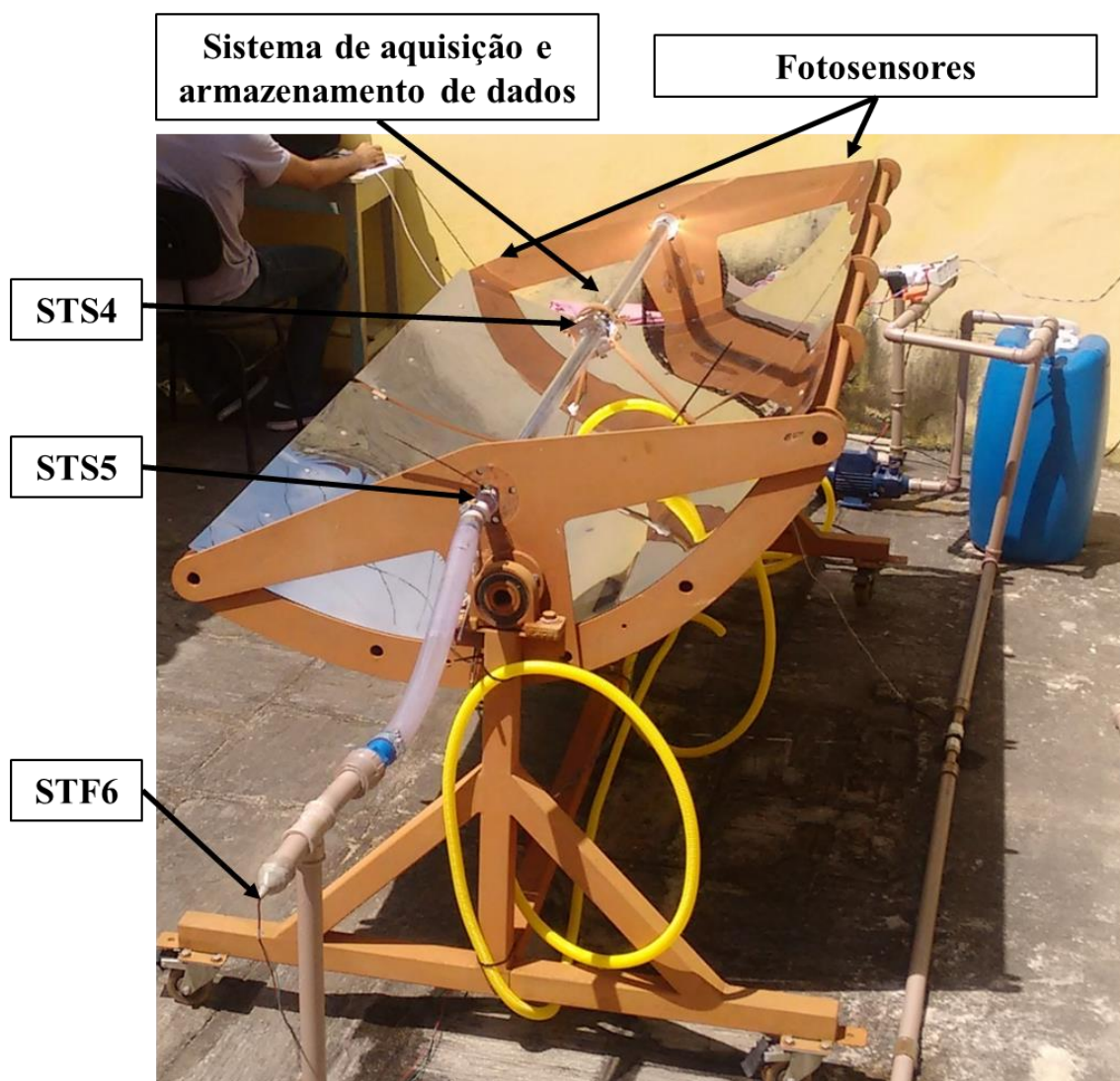
Após a montagem do sistema, foi instalada toda a instrumentação necessária para o teste de campo. A designação dos sensores segue a nomenclatura apresentada no capítulo 3 da Metodologia, na Figura 3.3. A montagem dos sensores está apresentada nas Figura 4.134 e Figura 4.135.

Figura 4.134 - Sensores utilizados no teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Figura 4.135 - Sensores utilizados no teste de campo do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Uma vez instalada a instrumentação do coletor, foi necessário fazer o correto posicionamento do Coletor Solar, de maneira que o seu tubo absorvedor ficasse alinhado com a direção Norte-Sul. Para determinar a angulação necessária utilizou-se o mapa do Google, como mostrado na Figura 4.136. A partir do mapa, foi traçado no Autodesk Inventor 2015, uma linha paralela ao muro e a partir dessa linha, foi calculada a inclinação do muro com relação a direção Norte-Sul. A inclinação obtida foi de $\sim 22^\circ$. Sabendo disso, durante os testes, o coletor foi inclinado 22° para leste, com relação ao muro da Suna Engenharia.

Figura 4.136 - Inclinação do muro da Suna Engenharia com relação a direção Norte-Sul



Fonte: Autoria própria

No início do ensaio o sistema deve partir do repouso e buscar o correto posicionamento com relação ao Sol. O sistema de rastreamento deve permitir que o foco geométrico coincida com o foco luminoso, de maneira que a radiação solar convirja para o tubo absorvedor. Contudo, durante os testes de campo, o sistema de controle de posição, com os fotosensores, estava trazendo instabilidade para o sistema de rastreamento, fazendo com que o coletor não seguisse o Sol da maneira adequada.

Após análises, percebeu-se que, para altas incidências de radiação, o sensor estava saturando e duas incidências diferentes de radiação, estavam sendo interpretadas como sendo iguais. Dessa maneira, o sistema está parando fora do seu ponto de operação, que seria quando os raios solares estivessem perpendiculares ao plano de abertura do coletor.

A solução encontrada foi a retirada do sistema de controle de posição por fotosensores e deixar o sistema funcionar simplesmente em malha aberta a partir do que foi determinado no gráfico da Figura 4.130.

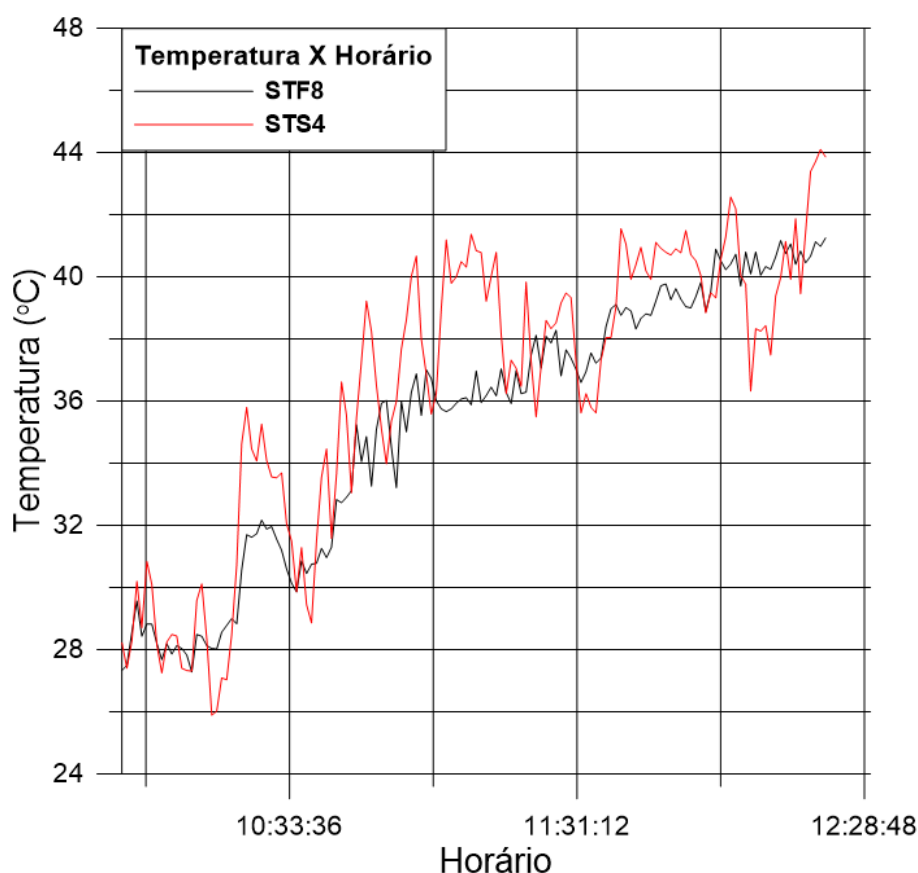
Durante os testes foram coletados os dados de temperatura e vazão a cada 1 minuto. A partir desses dados foram plotados curvas que são mostradas nas

Na Figura 4.137 vê-se o gráfico que compara as temperatura do interior do tanque de inércia térmica e a temperatura da superfície do tubo absorvedor. Como pode-se observar a

temperatura do interior do tanque apresenta uma variação térmica bem menor do que a da superfície do tubo. E as pequenas variações que se observa na temperatura do fluido no interior desse tanque são atribuídas a incidência de nuvens, uma vez que o ensaio foi feito num dia de céu parcialmente nublado.

Como deseja-se utilizar o coletor para fornecimento de calor para um processo contínuo, a possibilidade de funcionar mesmo com breves momentos de sombreamento é uma qualidade desejável, assim utilização do tanque de inércia térmica se mostra bastante útil para esse sistema, a fim de funcionar como um reservatório de calor a ser utilizado por breves momentos nublados.

Figura 4.137 - Temperatura X Horário para o tanque de inércia térmica (STF8) e a superfície do tubo absorvedor (STS4)

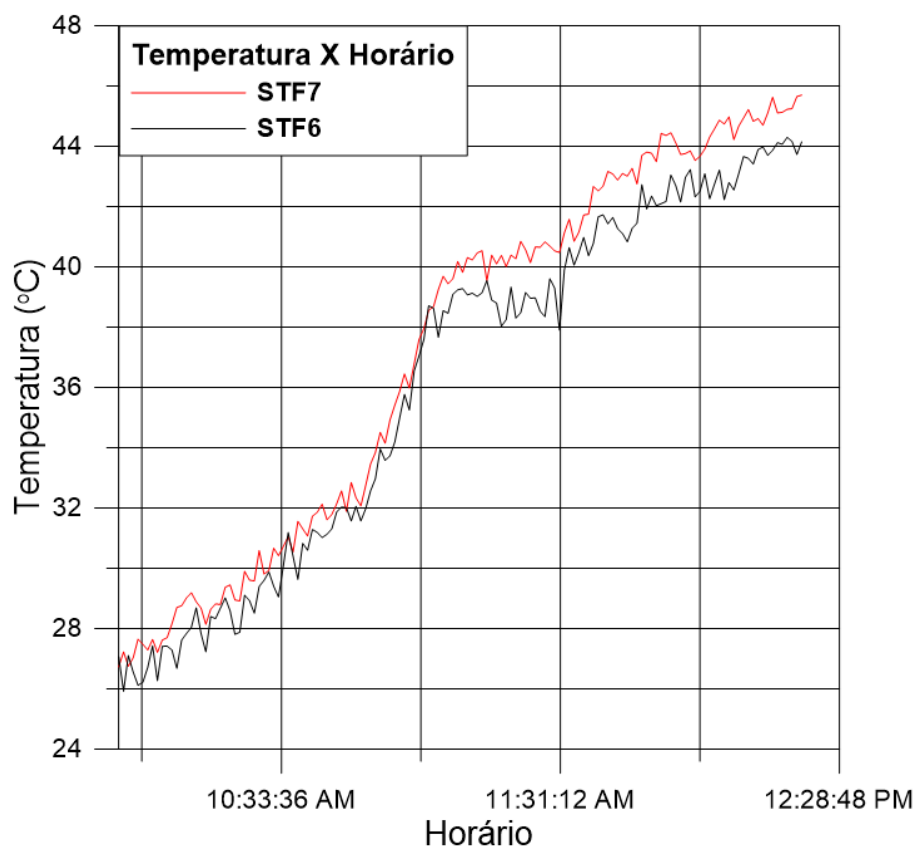


Fonte: Autoria própria

Na Figura 4.138 observa-se a variação da temperatura nas extremidades do tubo absorvedor. Como pode-se perceber as temperaturas são semelhantes, existindo uma pequena diferença entre elas, mostrando que após a passagem do fluido pelo tubo absorvedor ocorre um pequeno aumento na temperatura. Esse pequeno aumento se deve às dimensões do coletor. Caso

esse coletor fosse maior (ou existissem vários coletores conectados em série) a diferença de temperatura entre a entrada e a saída de fluido seria maior, refletindo uma maior transferência de energia para o fluido.

Figura 4.138 - Temperatura do fluido X Horário nas extremidades do tubo absorvedor.



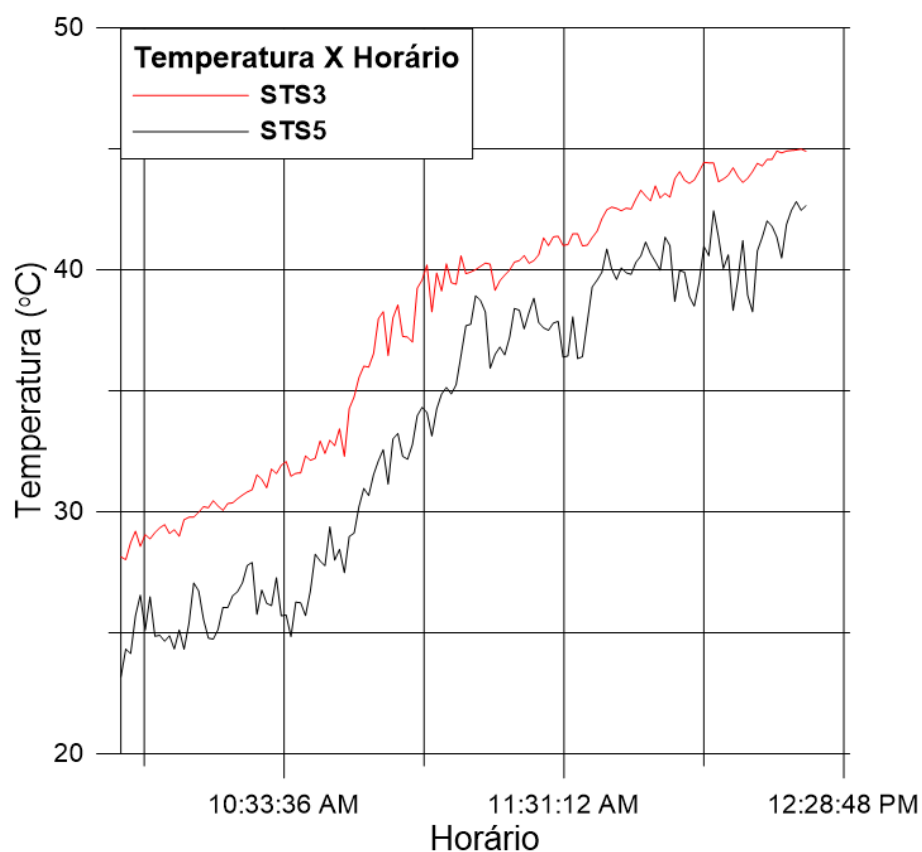
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 4.139 observa-se a variação da temperatura nas duas extremidades da superfície do tubo absorvedor durante o ensaio. Uma constatação que num primeiro momento parece indicar um erro de medição pois a temperatura parece estar decrescendo, ao passo que a temperatura do fluido está aumentando. Contudo esse fenômeno só ocorre na extremidade norte do coletor (caso contrário o fluido não estaria aquecendo) e é decorrente do fenômeno conhecido como “perdas de final de linha”. Esse fenômeno ocorre devido a inclinação do Sol com relação a direção Norte-Sul, fazendo com que uma das extremidades do tubo absorvedor não receba a radiação direta refletida, havendo assim uma redução de sua temperatura na superfície do tubo absorvedor. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 4.141. Caso houvesse um aumento do comprimento do coletor, ou a colocação de vários

coletores em série, esse fenômeno se tornaria menos perceptível a instrumentação, uma vez que, proporcionalmente, essas perdas se tornaria menores.

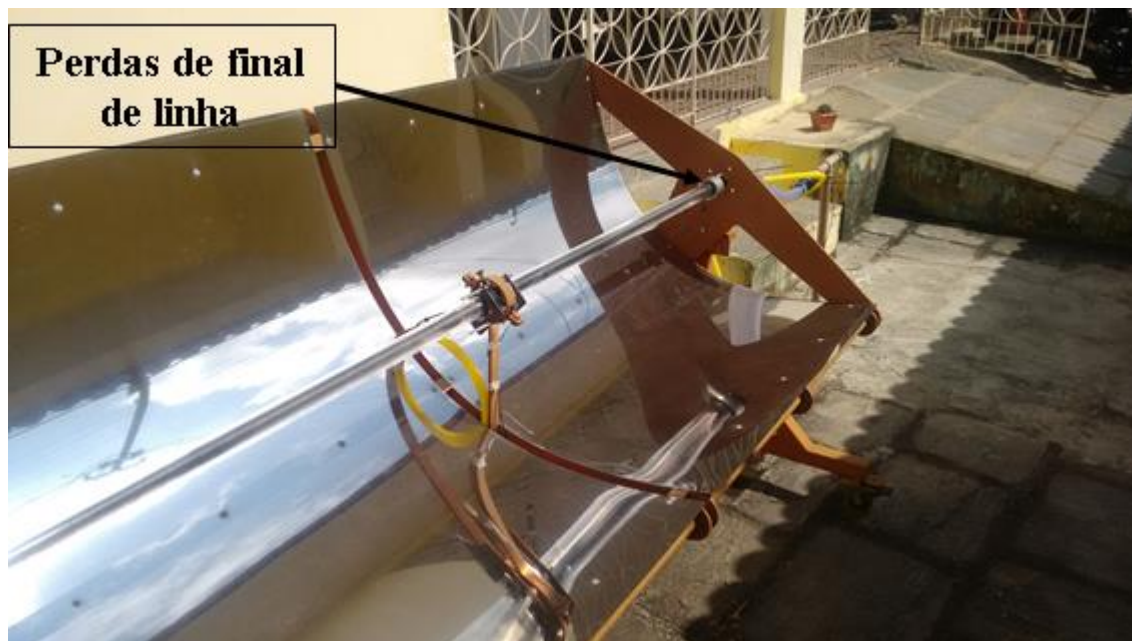
Vale também salientar que essas perdas de final de linha são variáveis durante o ano, pois há uma variação do posicionamento do Sol na direção Norte-Sul. Caso esse experimento fosse repetido após o dia 22 de setembro, as perdas de final de linha estariam voltadas para o lado Sul e o gráfico apresentado na Figura 4.139 seria invertido.

Figura 4.139 - Temperatura X Horário para as extremidades do tubo absorvedor



Fonte: Autoria própria

Figura 4.140 - Perdas de final de linha apresentadas pelo coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Figura 4.141 – Sombreamento da superfície refletiva devido as extremidades do coletor solar cilíndrico parabólico



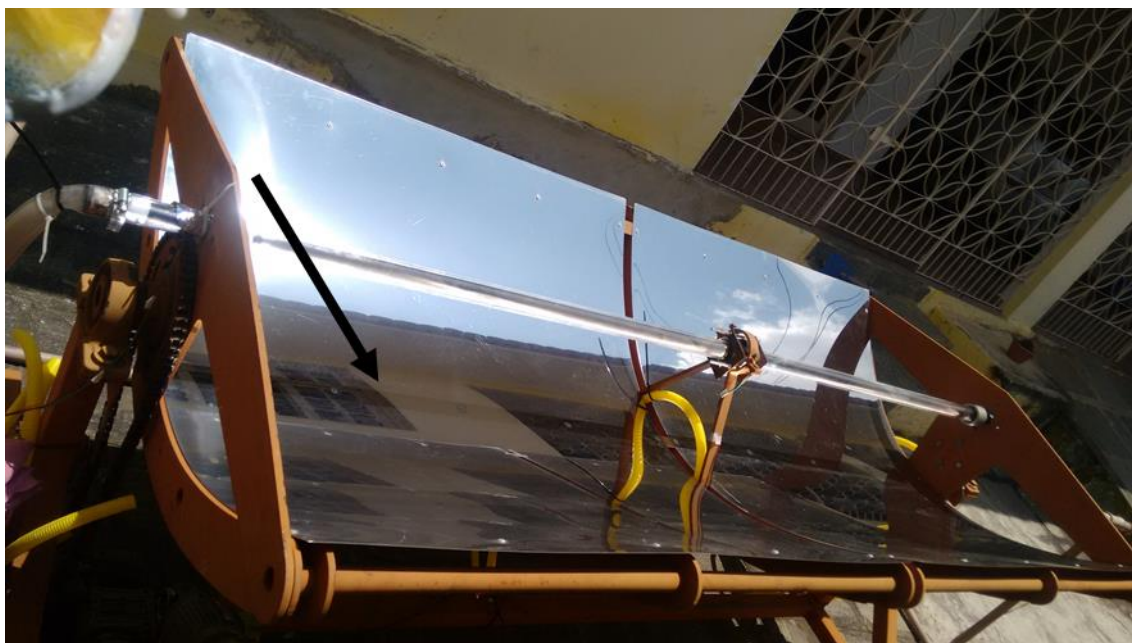
Fonte: autoria própria

Durante os ensaios também foi possível a realização de diversas análises visuais com relação aos aspectos construtivos do Coletor Solar Cilíndrico Parabólico. A primeira análise é o sombreamento de parte da superfície refletiva do lado Norte do coletor, como mostrado na Figura 4.141. Dessa forma, para efeito de cálculos de energia, a área do coletor é de apenas 1,91 m².

Uma outra análise realizada foi com relação a acurácia do sistema de rastreamento, que como mostrado na Figura 4.142. Uma vez que a linha de rebites está exatamente abaixo do tubo absorvedor, o fato da sombra do tubo está sob essa linha quando exposto ao Sol, prova que

a radiação incidente é perpendicular ao plano da borda do Coletor, mostrando assim a acurácia do sistema de rastreamento solar trabalhando em malha aberta.

Figura 4.142 - Acurácia do sistema de rastreamento solar do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Outra análise visual que pode ser realizada é a acurácia da superfície refletiva. Como pode-se observar na Figura 4.143, a maior parte da radiação que incide sobre a superfície refletiva é refletida para o tubo absorvedor, mostrando assim um bom fator de interceptação para essa superfície.

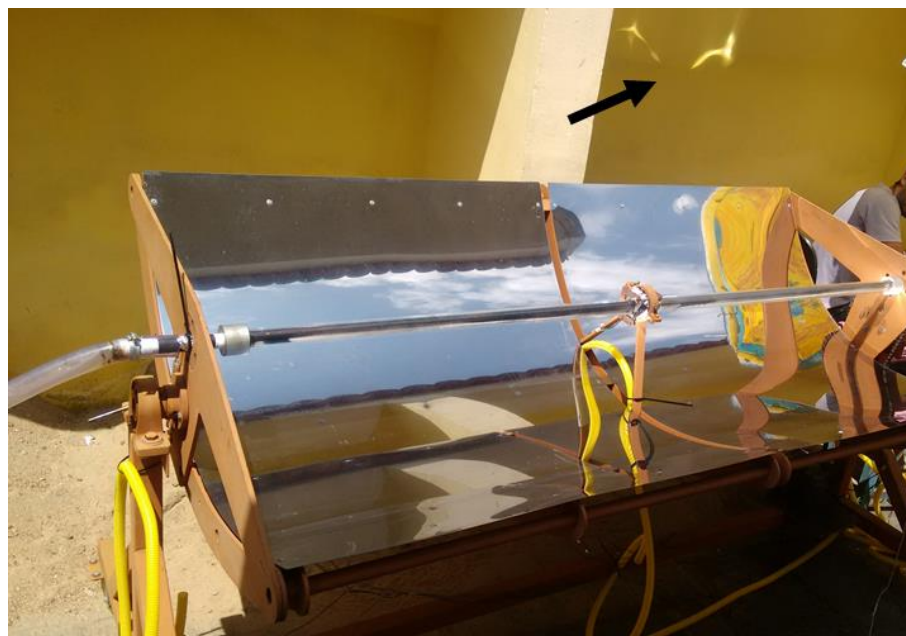
Contudo pode-se observar alguns pontos de dispersão de radiação, como mostrado na Figura 4.144. Esses pontos são consequências de desvios do perfil parabólico que foram consequência da falta de aderência entre a chapa de aço inox e as costelas do coletor. Uma das possibilidades para a correção desse desvia seria mapear o ponto de falta de aderência e realizar uma nova fixação da superfície refletiva.

Figura 4.143 - Acurácia da superfície refletiva do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Figura 4.144 - Pontos de dispersão de radiação da superfície refletora do coletor solar cilíndrico parabólico

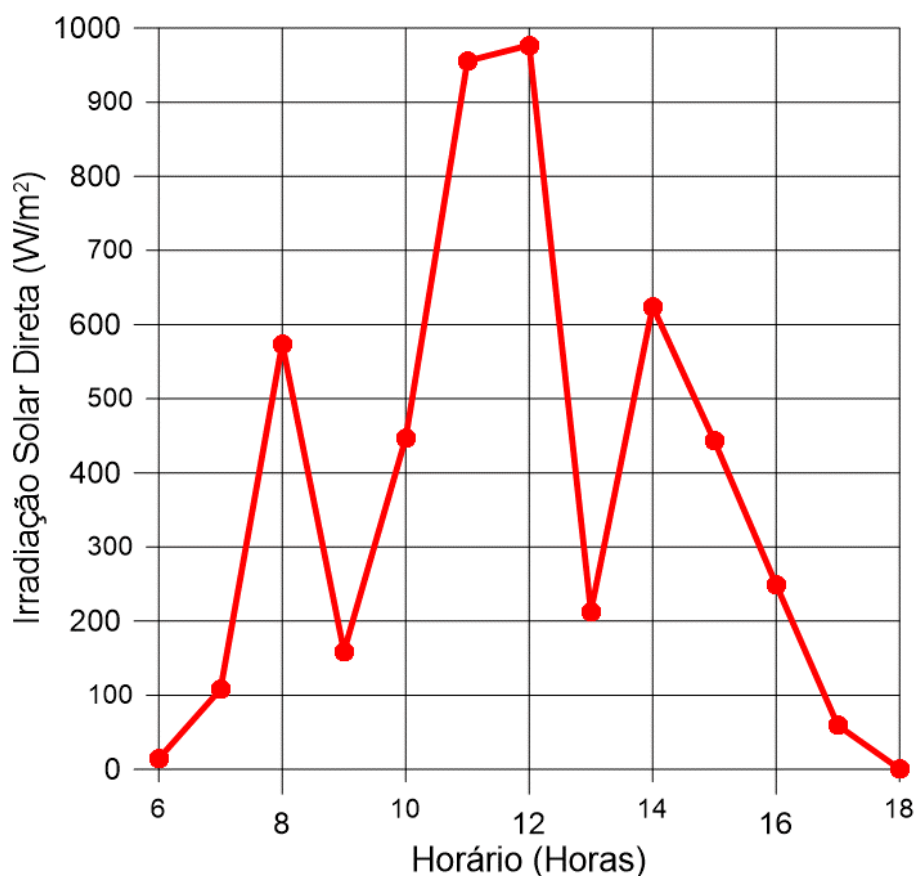


Fonte: Autoria própria

4.5.6 Cálculo da eficiência térmica

A partir dos dados de temperatura e sabendo a quantidade de radiação incidente no dia do ensaio é possível calcular a eficiência térmica do coletor. Para calcular a eficiência toma-se a curva de radiação no dia 27/08/2015, que está mostrada na Figura 4.145. Para calcular a quantidade de radiação solar que chegou até o coletor faz-se algumas considerações:

Figura 4.145 - Irradiação Solar Direta no dia 27/08/2015

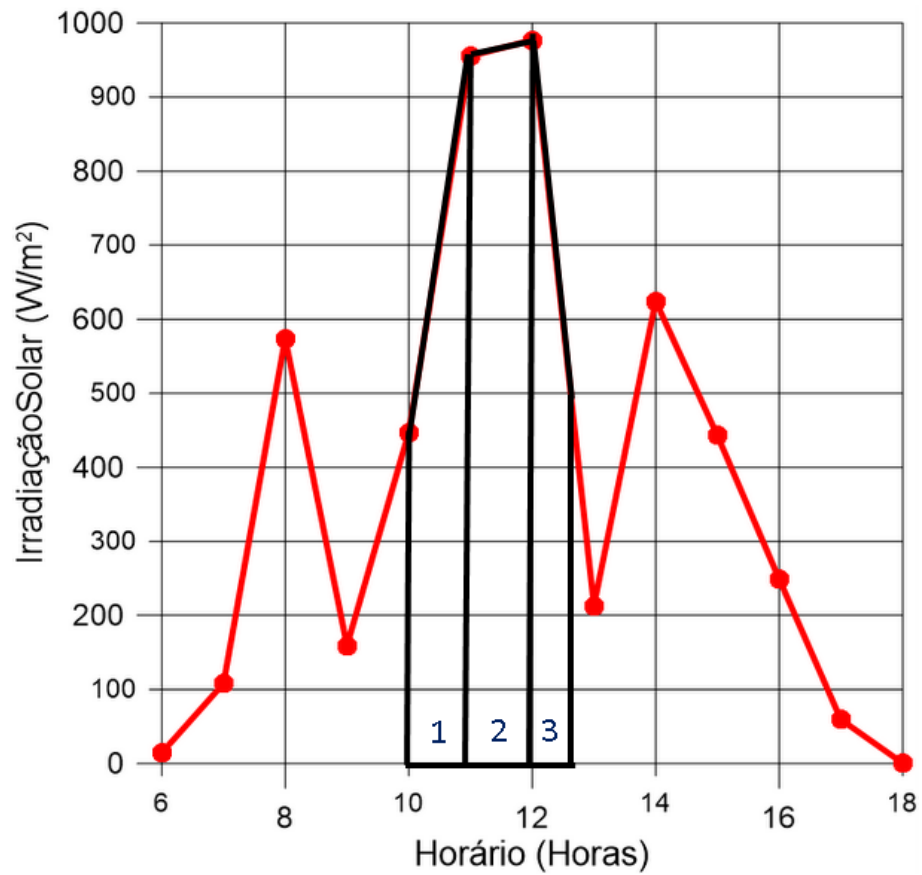


Fonte: Autoria própria

- Os dados de radiação são a média de 1 hora;
- A radiação cresce linearmente no intervalo de 1 hora.

A partir das consideração mencionadas acima, calcula-se a área abaixo da curva a fim de determinar a quantidade de energia que chegou até o coletor. O cálculo da área é feito segundo a Figura 4.146. A partir dessa figura e utilizando a equação 4.9, agora acrescentando as perdas de fim de linha e passando a chama-la de equação 4.9 modificada, tem-se:

Figura 4.146 - Irradiação Solar no dia 27/08/2015



Fonte: Autoria própria

$$\dot{Q}_{util} = (\eta \Gamma(\theta)) (\dot{Q}_{disp} A_{coletor})$$

onde a área abaixo da curva é numericamente igual a energia disponível, assim:

$$\dot{Q}_{disp} \stackrel{m}{=} A_1 + A_2 + A_3$$

Aproximando as áreas abaixo da curva por uma soma de trapézios pode-se calcular a área abaixo da curva durante o ensaio. Calculando as áreas tem-se:

$$A_1 = 2524,5 \text{ kJ/m}^2$$

$$A_2 = 3478,5 \text{ kJ/m}^2$$

$$A_3 = 2658,42 \text{ kJ/m}^2$$

Assim,

$$\dot{Q}_{disp} = 8661,42 \text{ kJ/m}^2$$

A quantidade de calor absorvido pela sistema (\dot{Q}_{util}) é calculada pela equação do calor sensível:

$$\dot{Q}_{util} = mc\Delta T$$

Onde,

- m – fluxo de massa de água;
- c – calor específica da água;
- ΔT – Variação de temperatura entre o início e o fim do teste.

Assim,

$$\dot{Q}_{util} = 4146,56 \text{ kJ}$$

As perdas de final de linha, considerando o $\theta = 15,2^\circ$, que era a inclinação do Sol na direção Norte-Sul no dia do ensaio. Assim, utilizando a equação 4.3, tem-se que as perdas de final de linha são:

$$\Gamma(\theta) \cong 0,95$$

Assim, substituindo os valores na equação 4.9 modificada a eficiência do coletor como:

$$\eta = 27,7\%$$

Assim, desconsiderando as perdas térmicas do sistema, a eficiência do coletor foi de 27,7%.

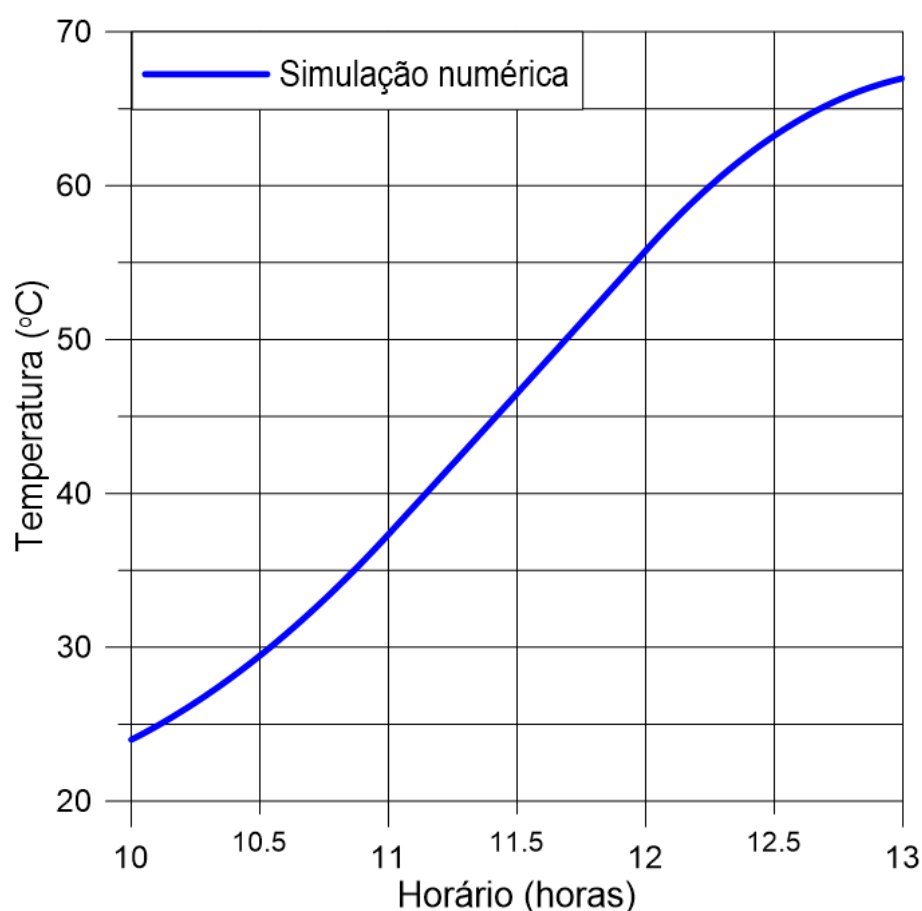
4.5.7 – Comparação entre os resultados experimentais e simulação numérica

Com objetivo de melhor avaliar o comportamento do sistema de aquecimento, utilizou-se um software desenvolvido por Coutinho (2013) no seu doutorado. Esse software permite avaliar o desempenho do sistema de aquecimento utilizando um coletor solar cilíndrico parabólico, a partir de dados de radiação solar, velocidade e temperatura do ar e propriedades

dos materiais dos quais são constituídos o coletor e as suas tubulação. O software funciona a partir da solução das equações fenomenológicas envolvidas no processo de aquecimento termosolar.

Para a realização da simulação foram utilizados os dados de radiação apresentados na Figura 4.145 bem como os dados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A partir desses dados foram simulado o aquecimento partindo da primeira temperatura ambiente no dia do experimento ($24,1^{\circ}\text{C}$) e a partir de 10 horas até as 13 horas, totalizando assim quatro (03) horas reais de simulação. A partir dessa simulação foi obtida a Figura 4.147.

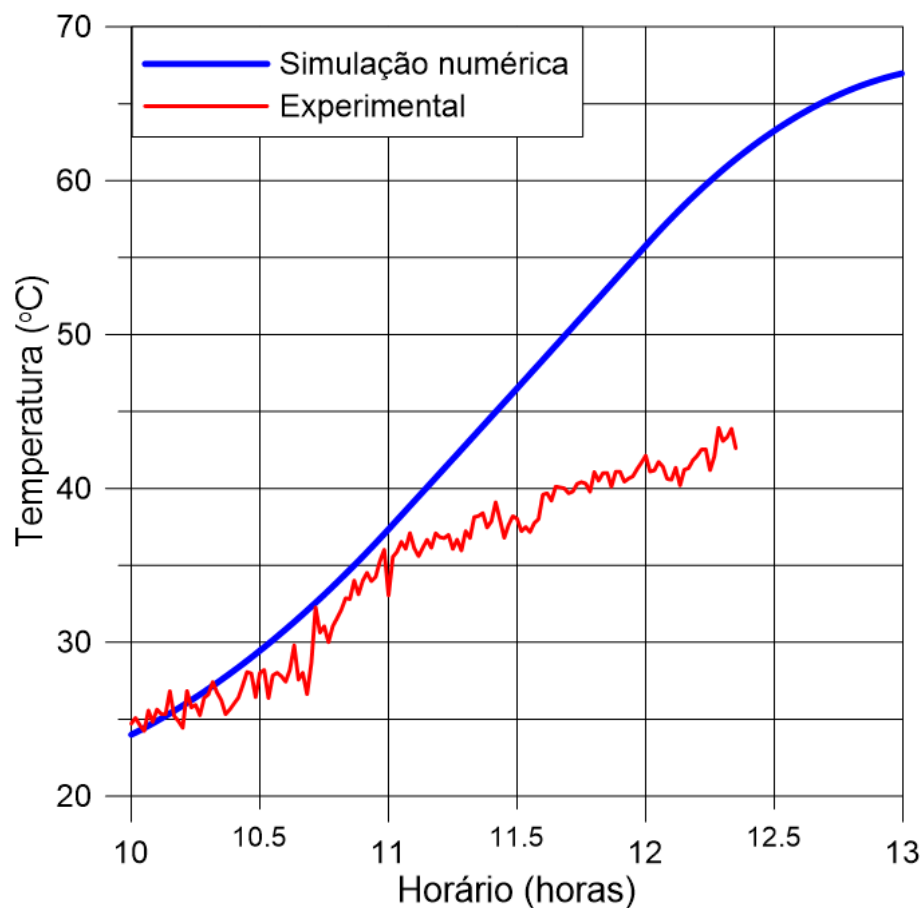
Figura 4.147 - Simulação Numérica de aquecimento para o coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

Observa-se que a curva numérica apresenta um comportamento semelhante aos dados experimentais. Para melhor avaliar essa relação sobrepõem-se as curvas, como mostrado na Figura 4.148.

Figura 4.148 - Comparação entre os dados experimentais e simulação numérica do coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Autoria própria

A curva de simulação é maior que a do experimento devido a uma limitação dos dados de radiação disponíveis. Como foram carregados dados com intervalo de 1 hora, optou-se por não fazer interpolação e realizar a simulação com horas inteiras, assim o experimento se estendeu de 10 horas as 13 horas.

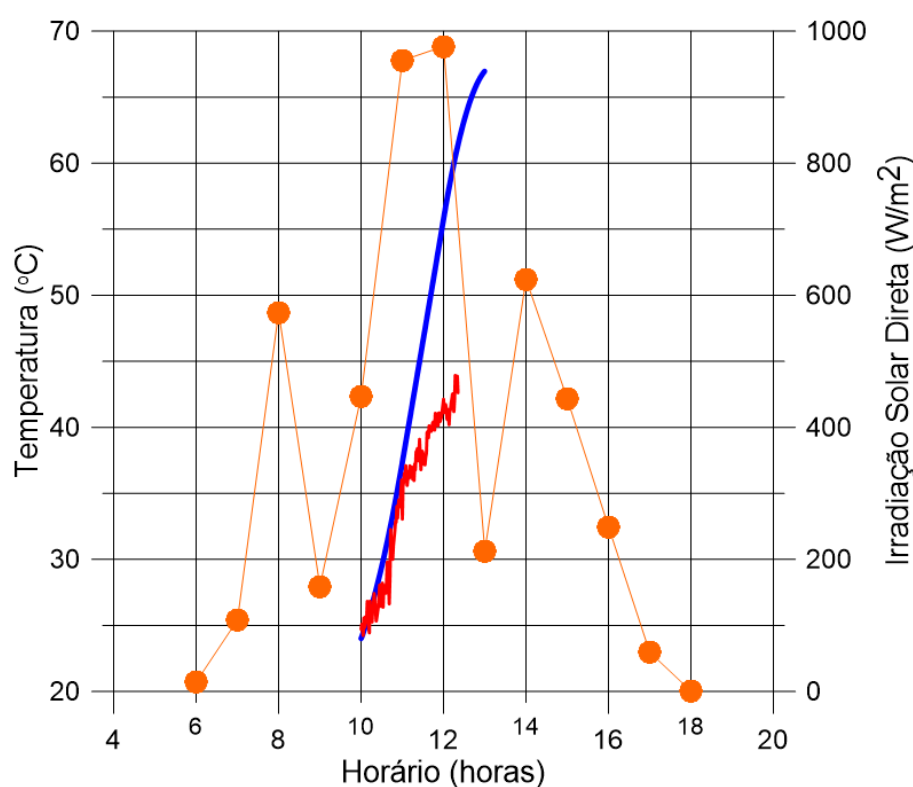
Como pode-se observar na Figura 4.148, ambas as curvas apresentam inclinações semelhantes, o que mostra que a taxa de aquecimento é semelhante para os dois casos. As diferenças entre as curvas são atribuídas a limitação do software quanto a captar todas as características do coletor, como o seu fator de interceptação, perdas de final de linha e as perdas térmicas para o ambiente.

Observa-se na Figura 4.148 que um pouco após as 11h, há uma mudança na derivada de ambas as curvas tendo como consequência o aumento mais acentuado da temperatura na simulação. Observa-se também na Figura 4.148, que após as 11h há um distanciamento entre

as duas curvas. Essa divergência é atribuída as perdas térmicas do sistema, que se acentuam devido ao aumento de temperatura.

Outra análise que pode ser realizada é a comparação entre as duas curvas quando sobrepostos a curva de radiação solar direta. Essa comparação é mostrada na Figura 4.149. Nessa figura observa-se um *delay* entre a curva de radiação e a de temperatura. Essa defasagem ocorre devido a capacitância térmica do sistema, devido a utilização do tanque de inércia térmica. Esse fenômeno é mostrado por Müller et al. (2010), que mostra que o pico de temperatura esteja defasado de aproximadamente 2 horas do pico de radiação.

Figura 4.149 - Sobreposição entre os dados simulados e experimentais do coletor solar cilíndrico parabólico com a radiação solar direta no dia do experimento



Fonte: Autoria própria

O software desenvolvido por Coutinho (2013) permite também a realização de diversas outras análises, como a variação da eficiência ao longo do tempo. Contudo seria necessário o estudo de diversos parâmetros do coletor, o que não é o foco dessa dissertação. Devido a essa limitação, só é possível fazer análises globais, como as mostradas na Figura 4.147.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho conclui-se que:

- Foi possível o projeto, fabricação e teste do coletor solar cilíndrico parabólico usando tecnologia local;
- Foi possível a simulação do coletor solar cilíndrico parabólico e comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais;
- O protótipo desenvolvido tem 2 m² de área de coleta, com 2 m lineares de tubo absorvedor, ângulo de borda de 90°, superfície refletiva construída com aço inox, tem em seu sistema de rastreador um atuador que utiliza um motor de ¼ CV, custou R\$ 6000,00 para ser fabricado e apresentou uma eficiência de 27,7%;
- Embora a dificuldade de se obter um sistema de rastreamento solar com uma elevada precisão, foi possível a obtenção de um sistema estável e com velocidade de rotação que permitiu uma correção no posicionamento do coletor a cada 2,2 minutos;
- O método utilizado para os testes de campo permitiram a realização de análises integrais de performance do coletor, como a eficiência térmica;
- O aumento da irradiação térmica leva a um aumento da temperatura da água no tanque pulmão. Entretanto os picos de temperatura estão defasados, como descrito na literatura;
- Segundo a simulação usando FEA (*Finite Elements Analysis*), a estrutura do coletor solar cilíndrico parabólico possui alta rigidez, apresentando uma deformação 0,1 mm quando submetido a uma carga de vento à 15 m/s. Deformação que não diminui o fator de interceptação do coletor;
- A coincidência do eixo de giro, com o centro de massa permitiu a utilização de um motor elétrico de baixa potência, diminuindo a demanda de energia para a operação do equipamento;
- A coincidência do centro de giro para o centro de massa obriga a utilização de tubos flexíveis, aumentando as exigências técnicas para as conexões entre o tubo absorvedor

e a tubulação de trabalho, com o objetivo de evitar vazamento de fluido durante a operação do sistema;

- Em consequência da elevada rigidez estrutural o coletor solar cilíndrico parabólico apresentou elevado peso e alto custo de fabricação;
- O aumento de temperatura por passe no coletor solar cilíndrico parabólico é pouco devido ao pequena a pequena área de coleta;
- As perdas de final de linha diminuem a quantidade de energia que poderia ser absorvida pelo tubo absorvedor;
- A utilização de um tanque de inércia térmica torna a temperatura sistema mais estável, possibilitando o mesmo funcionar adequadamente, mesmo sob breves períodos sem Sol.
- A utilização combinada de redutores de velocidades (coroa e sem-fim) junto com a transmissão por corrente, conferiu estabilidade ao sistema de rastreamento solar, permitindo um deslocamento contínuo e sem mudanças bruscas durante os acionamentos intermitentes;
- A utilização de redutores de velocidade (coroa e sem-fim) permitiu que o coletor permanecesse estável durante os períodos em que o motor elétrico não estava acionado. Permitindo que o sistema funcionasse com baixo consumo de energia elétrica;
- A utilização de um sistema de rastreamento autotravante, permite ao seu atuador permanecer ligado apenas 2% do tempo de operação, levando a um baixo consumo de energia durante a operação do coletor solar cilíndrico parabólico;
- A utilização de um sistema de rastreamento solar com maiores intervalos entre acionamentos, permite a utilização de menores sistemas de redução, barateando assim o sistema de rastreamento solar;
- Foi possível a fabricação da instrumentação para aquisição de temperatura e vazão a partir da utilização do micro controlador Arduino e do microcomputador Raspbary que apresentou elevada estabilidade de funcionamento durante a realização de todos os testes com o coletor.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Construção do coletor solar cilíndrico parabólico em materiais que permitam um maior eficiência térmica e ótica;
- Melhorar a instrumentação do Coletor Solar de maneira que o mesmo possa ser monitorado a distância e permita um acompanhamento dos gráficos de temperatura em tempo real via internet;
- Desenvolver uma sistema de redução para ser utilizado no rastreador solar que permita a utilização de menores tempos entre acionamento, possibilitando assim uma maior precisão no rastreamento solar, o que aumentará a eficiência do coletor;
- Aumentar a robustez do sistema de controle de posicionamento do Coletor Solar, de maneira que ele possa ser monitorado a distância e possa funcionar sem a intervenção humana, mesmo quando submetidos a perturbações do ambiente;
- Minimizar o peso da estrutura, sem que para isso haja perda de resistência mecânica para não ocorrer desvios devido a carregamento de vento;
- Melhorar o modo de fixação da superfície refletora a fim de minimizar as dispersões de radiação para fora do tubo absorvedor.

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS

A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Pérez, **Parabolic-trough solar collectors and their applications**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 7, September 2010, Pages 1695-1721, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>.

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000675>>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2002) apud Curso Tecnologia de Aquecimento Solar: **Noções Iniciais sobre o Aquecimento Solar**. Disponível em: <<http://www.mesasolar.org.uy/archivos/Noco.es.pdf> Acesso em 12/04/2015>

AMATON SA (Estados Unidos da América). Gunther Kuns. **Parabolic Trough Collector**. US nº US 2010/0051021A1, 07 mar. 2010, 04 mar. 2010

BAPTISTA, A. S. C. **Análise da Viabilidade Econômica da Utilização de Aquecedores Solares de Água em Resorts no Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, 2006. 171 p.

Brooks, M. J. **Performance of a parabolic trough solar collector**, M Sc (Eng) thesis. University of Stellenbosch, 2005.

Burkholder, F./Kutscher, C. **Heat-Loss Testing of Solel's UVAC3 Parabolic Trough Receiver**. Technical Report NREL/TP-550-42394, 2008. <<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42394.pdf>>. Acesso em 11 de jul. 2011.

COUTINHO, Sebastião Araújo. **Estudo Teórico e Experimental de um Dessalinizador Solar para Tratar Água Salobra**. 2013. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

DOW CORNING CORPORATION (Midland). Frank Perrin; Cold Knap Way. **SOLAR REFLECTION APPARATUS**. US nº 20130056000A1, 11 maio 2011, 7 mar. 2015. .

Disponível em:

<<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US20130056000.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2015.

DORNELLES K.A., **Absortância Solar de Superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Campinas-SP 2008; Tese de doutorado

DUFFIE. A. J., BECKMAN. A. W., **Solar Engineering of Thermal Processes**, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc, 2006

FANGG, LIU X, LI H. **Preparation and properties of lauric acid/silicon dioxide composites as form-stable phase change materials for thermal energy storage**. Materials Chemistry and Physics 2010;122:533–6.

H P Garg & J Prakash. **Solar Energy Fundamentals and Applications**. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing, 2008.

GÜNTHER, M.. Solar Radiation. In: JANOTTE, Nicole (Comp.). **EnerMENA CSP Teaching Materials**. Amman, Jordânia: Enermena, 2011. Cap. 2. p. 15-130. Disponível em: <http://www.4shared.com/office/qm6Uae1k/chapter_02_solar_radiation.html>. Acesso em: 01 ago. 2015.

GÜNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S. Parabolic Trough Technology. In: ENERMENA (Jordânia). **Advanced CSP Teaching Materials**. Amman: Enermena, 2011. p. 245-317. Disponível em: <http://www.4shared.com/office/ZU40pNM-/chapter_05_parabolic_trough_te.html>. Acesso em: 01 ago. 2015.

HO, D. A.; ITO, E. A.. **Projeto e Construção de Aquecedor Solar com Concentrador**. 2007. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

HO, Clifford K. **Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies**. Sandia National Laboratories, United States Department of Energy's National Nuclear Security Administration. California, 2008. Disponível em:

<<http://www.solarthermalworld.org/files/software%20and%20codes.pdf?download>>

INC. SOLAR KINETICS (Dallas, Texas). J. A. Hutchison. **SOLAR COLLECTOR SYSTEM**. US nº 4178913, 23 dez. 1977, 18 dez. 1979. . Disponível em: <<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4178913.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2015.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, LTC Editora; Rio de Janeiro, 2011.

KALOGIROU, S. A., 2009. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.

KEMPFER, T. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar**. 2011. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2011. Disponível em:

<<http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/view/1215/289>>. Acesso em: 20 maio 2015.

KUMAR, P.; SRINATH; REDDY, V. Design, Fabrication and Experimental Testing of Solar Parabolic Trough Collector with Automated Tracking Mechanism. **International Journal Of Research In Aeronautical And Mechanical Engineering**.Bangaluru, 04 ago. 2013. p. 37-55. Disponível em:

<https://www.academia.edu/4537499/Design_Fabrication_and_Experimental_Testing_of_Solar_Parabolic_Trough_Collectors_with_Automated_Tracking_Mechanism>. Acesso em: 23 jul. 2015.

Li YW, Wang RZ, Wu JY, Xu YX. **Experimental performance analysis and optimization of a direct expansion solar-assisted heat pump water heater**. Energy 2007;32:1361–74.

LOPEZ, R. A. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002. 155 p.

MARENGO, J. A.; DIAS, P. S. **Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos**. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Ed.) Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, 2006.

MATTOS, S. R. **Análise do rendimento térmico do aquecedor solar parabólico cilíndrico**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

MATRAI, B. B. **PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR CONCENTRADOR**. 2008. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2008. Disponível em:
<[http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Trabalhos finais/TCC_011_2008.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Trabalhos%20finais/TCC_011_2008.pdf)>. Acesso em: 17 maio 2015.

MEINEL, A. B., MEINEL, M.P., **Applied Solar Energy – An Introduction**, Addison-Wesley Pub. Co., 1ª Edição, 1976.

MOHR, M., SVOBODA, P., UNGER, H. (1999): **Praxis solarthermischer Kraftwerke**. Berlin, Heidelberg: Springer.

MÜLLER, C. et al. **Solar Thermal Desalination Systems with Multi-layer Heat Recovery**. Berlin: Thermal Energy Council, 2010. Disponível em: <http://www.hc-solar.de/desalination_2004_cm.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2015.

ODEH, Saad D.; ABU-MULAWEH, Hosni I. Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system. **Global Journal Of Engineering Education**. Austrália, p. 21-27. jan. 2013.

ODEH, Saad D.; ABU-MULAWEH, Hosni I. **Design and development of an educational solar tracking parabolic trough collector system**. Global Journal Of Engineering Education. Adelaide, p. 21-27. out. 2013.

PHILIBERT, C., FRANKL, P., DOBROTKOVA, Z.. **Technology roadmap: Concentrating Solar Power**. **Internacional** Energy Agency (IEA), 2010. Disponível em:
<http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf>

PIGOZZO FILHO, V. C.. **Análise Experimental de um Sistema Solar com Concentrador Cilindro Parabólico**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/106707/319742.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 maio 2015.

POTTER, Merle C.; WIGGERT, David C.. **Mecânica dos Fluidos**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 690 p.

PYTLINSKI, J.T. **Solar Energy Installations for Pumping Irrigation Water**. **Solar Energy**. Vol. 21 pg 255-262. Pergamon Press Ltd. 1978.

RABL, A. **Active Solar Collectors and Their Application**. Oxford University Press, 1ed. 1985.

SADE W., **Produção de Superfícies Seletivas de Ni/NiO para aplicações em Coletores Solares** Tese de Doutorado-BH, 8/8/2011.

SOLAR KINETICS, INC. (Estados Unidos da América). J. A. Hutchison. **Solar collector system**. US nº US4178913 A, 23 dez. 1977, 18 dez. 1979. Disponível em:
<<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4178913.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2015.

SOLARPACES: “Solar Dish Engine”. Disponível em:
<www.solarpaces.org/CSP_Technology/docs/solar_dish.pdf> [July2011]

SOUZA FILHO, José Ribeiro de. **Projeto, Construção e Levantamento de Desempenho de um Concentrador Solar Cilindro Parabólico com Mecanismo Automático de Rastreamento Solar**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

WILLIAM C. M.; PATRICIA K. S.. **Solar Energy Converter**. US n° US 4,000,734, 06 nov. 1975 - 04 jan. 1977.